

Archivi Pietrificati: Stratigrafia Urbana, Palinsesti Architettonici e Archeologia della Stratificazione Edilizia

Fondamenti della Stratigrafia Urbana e Teoria della Sovrapposizione

La Città come Documento Stratigrafico

Le città rappresentano archivi straordinariamente complessi della memoria umana, dove ogni edificio, ogni strada, ogni frammento di muratura costituisce una pagina di un testo plurimillenario scritto nella pietra, nel mattone, nel legno e in tutti i materiali che le civiltà hanno impiegato per costruire i propri spazi abitativi. A differenza degli archivi tradizionali, dove i documenti sono organizzati secondo criteri razionali e intenzionali, le città sono archivi involontari, depositi accidentali di informazione storica che si accumulano attraverso processi di costruzione, distruzione, abbandono e ricostruzione che si estendono su scale temporali che possono abbracciare millenni.

La comprensione di questo archivio pietrificato richiede l'applicazione di metodologie mutate dall'archeologia, dalla geologia, dalla matematica applicata e dalle scienze della complessità. Il tessuto urbano non è semplicemente una collezione di edifici coesistenti nello spazio, ma piuttosto una sequenza temporale multidimensionale dove ogni elemento occupa una posizione ben definita non soltanto nelle tre dimensioni spaziali, ma anche lungo l'asse del tempo. La stratigrafia urbana, disciplina che si è sviluppata principalmente nella seconda metà del ventesimo secolo grazie ai contributi fondamentali di Edward Cecil Harris, fornisce il quadro teorico e metodologico per decifrare questo complesso palinsesto architettonico.

La Legge di Sovrapposizione e i Principi Fondamentali della Stratigrafia

Il principio cardine della stratigrafia archeologica, mutuato dalla geologia stratigrafica sviluppata da Nicolaus Steno nel diciassettesimo secolo, è la legge di sovrapposizione. Questo principio, apparentemente semplice nella sua formulazione, afferma che in una sequenza di depositi non perturbati, gli strati inferiori sono più antichi di quelli superiori. Nel contesto urbano, questo principio si applica non soltanto ai depositi di terreno e ai resti archeologici sepolti, ma anche alle strutture in elevato, alle murature, alle superfici pavimentali e a tutti gli elementi costruttivi che compongono il tessuto edilizio.

La legge di sovrapposizione si basa su un assunto fondamentale: la freccia del tempo procede in una sola direzione, e i processi di deposizione o di costruzione avvengono sequenzialmente. Un muro costruito nel quattordicesimo secolo non può fisicamente poggiare su fondazioni realizzate nel quindicesimo secolo, a meno che non si verifichino processi di disturbo post-deposizionale che alterino la sequenza originaria. Questi processi

di disturbo, che possono includere fenomeni naturali come terremoti, frane, inondazioni, oppure attività antropiche come scavi, ristrutturazioni e demolizioni, rappresentano la principale fonte di complessità nell'interpretazione stratigrafica.

La formulazione rigorosa della legge di sovrapposizione richiede l'introduzione di alcune definizioni formali. Definiamo un'unità stratigrafica come un volume discreto di materiale, naturale o antropico, che presenta caratteristiche fisiche omogenee e che può essere distinto dalle unità adiacenti. Nel contesto archeologico urbano, le unità stratigrafiche possono essere di natura molto diversa: possono essere strati di terreno, riempimenti di fosse, livelli pavimentali, murature, interfacce di distruzione o di taglio. Ogni unità stratigrafica possiede attributi fisici caratteristici quali composizione materiale, colore, tessitura, consistenza, inclinazione e limiti spaziali.

La relazione di sovrapposizione tra due unità stratigrafiche A e B può essere formalizzata come una relazione binaria antisimmetrica e transitiva. Se indichiamo con il simbolo "<" la relazione "è più antico di", possiamo scrivere $A < B$ per indicare che l'unità A è stata depositata o costruita prima dell'unità B. Questa relazione soddisfa le proprietà seguenti:

Antisimmetria: se $A < B$, allora non è vero che $B < A$, ovvero se A è più antico di B, allora B non può essere più antico di A.

Transitività: se $A < B$ e $B < C$, allora $A < C$, ovvero se A è più antico di B e B è più antico di C, allora A è necessariamente più antico di C.

Queste proprietà matematiche sono fondamentali perché definiscono la relazione di sovrapposizione come un ordinamento parziale, concetto che verrà approfondito nella sezione dedicata agli insiemi parzialmente ordinati.

La Harris Matrix: Rappresentazione Grafica delle Relazioni Stratigrafiche

Edward Cecil Harris, archeologo britannico, ha rivoluzionato la pratica stratigrafica archeologica negli anni Settanta del ventesimo secolo introducendo un metodo sistematico per registrare e rappresentare le relazioni stratigrafiche attraverso diagrammi che sono oggi universalmente conosciuti come matrici di Harris. La Harris Matrix non è una matrice nel senso matematico convenzionale del termine, ma piuttosto un grafo aciclico diretto che visualizza le relazioni di priorità temporale tra le unità stratigrafiche.

La costruzione di una Harris Matrix segue regole precise e rigorose. Ogni unità stratigrafica è rappresentata da un nodo, tipicamente visualizzato come un rettangolo contenente il numero identificativo dell'unità. Le relazioni stratigrafiche dirette sono rappresentate da archi orientati che connettono i nodi. Se l'unità A si trova fisicamente sopra l'unità B, e non esistono unità intermedie tra di esse, allora si traccia un arco diretto da B verso A, con la freccia che punta verso l'unità più recente.

Un aspetto cruciale della Harris Matrix è la regola di rappresentazione delle sole relazioni dirette. Se l'unità A poggia sull'unità B, e B poggia sull'unità C, non si traccia un arco diretto da C ad A, poiché questa relazione può essere dedotta per transitività dalla sequenza $C \rightarrow B \rightarrow A$. Questa convenzione mantiene il diagramma il più semplice possibile, eliminando la ridondanza e facilitando la lettura delle sequenze stratigrafiche complesse.

La Harris Matrix è tecnicamente un grafo aciclico diretto, in inglese Directed Acyclic Graph o DAG. La proprietà di aciclicità è fondamentale: non possono esistere cicli nel grafo, ovvero non può esistere una sequenza di archi che, partendo da un nodo, ritorni allo stesso nodo seguendo la direzione delle frecce. L'esistenza di un ciclo indicherebbe una contraddizione logica, dove un'unità sarebbe contemporaneamente più antica e più recente di un'altra, il che è fisicamente impossibile in assenza di macchine del tempo.

Dal punto di vista della teoria dei grafi, una Harris Matrix rappresenta un ordinamento topologico delle unità stratigrafiche. Un ordinamento topologico è una disposizione lineare dei nodi di un DAG tale che, per ogni arco orientato che va dal nodo u al nodo v , il nodo u appare prima del nodo v nella sequenza. Nel contesto stratigrafico, l'ordinamento topologico corrisponde a una possibile sequenza cronologica completa degli eventi di deposizione o costruzione. È importante notare che, in generale, possono esistere molteplici ordinamenti topologici validi per un dato DAG, riflettendo l'incertezza intrinseca nella datazione relativa di unità che non hanno relazioni stratigrafiche dirette tra loro.

Matematica della Stratigrafia: Insiemi Parzialmente Ordinati

La formalizzazione matematica delle relazioni stratigrafiche trova la sua espressione più rigorosa nella teoria degli insiemi parzialmente ordinati, comunemente abbreviati come poset dall'inglese partially ordered set. Un poset è una coppia $(S, \leq)$ dove S è un insieme di elementi e $\leq$ è una relazione binaria su S che soddisfa tre proprietà fondamentali:

Riflessività: per ogni elemento a appartenente a S , vale $a \leq a$, ovvero ogni elemento è in relazione con se stesso.

Antisimmetria: per ogni coppia di elementi a, b appartenenti a S , se $a \leq b$ e $b \leq a$, allora $a = b$, ovvero due elementi distinti non possono essere entrambi maggiori o uguali l'uno all'altro.

Transitività: per ogni tripla di elementi a, b, c appartenenti a S , se $a \leq b$ e $b \leq c$, allora $a \leq c$, ovvero la relazione si propaga attraverso catene di confronti.

Nel contesto stratigrafico, l'insieme S è costituito dalle unità stratigrafiche identificate durante lo scavo o il rilievo architettonico, e la relazione $\leq$ rappresenta la relazione "non è più recente di" oppure "è più antico o contemporaneo di". La riflessività è banalmente soddisfatta, poiché ogni unità è contemporanea a se stessa. L'antisimmetria garantisce che due unità distinte non possano essere simultaneamente una più antica dell'altra. La transitività permette di dedurre relazioni indirette dalla composizione di relazioni dirette.

Un aspetto fondamentale degli ordinamenti parziali in stratigrafia è proprio la loro parzialità. In un ordinamento totale, come quello dei numeri reali con la relazione "minore o uguale", ogni coppia di elementi è confrontabile, ovvero per ogni a e b vale necessariamente $a \leq b$ oppure $b \leq a$. In un ordinamento parziale, possono esistere coppie di elementi incomparabili, ovvero tali che né $a \leq b$ né $b \leq a$. Nel contesto stratigrafico, due unità sono incomparabili quando non hanno alcuna relazione stratigrafica diretta o indiretta tra loro, il che significa che non possiamo determinare quale sia più antica basandoci esclusivamente sui dati stratigrafici.

L'incomparabilità stratigrafica è estremamente comune nelle situazioni reali. Consideriamo ad esempio due muri costruiti in quartieri distanti di una città nel corso del quindicesimo secolo. Se non esistono connessioni stratigrafiche tra i due edifici, e se non disponiamo di altre informazioni cronologiche, non possiamo stabilire quale dei due muri sia stato costruito per primo basandoci unicamente sulla stratigrafia. Questa incertezza è intrinseca al metodo stratigrafico e rappresenta uno dei motivi per cui la datazione assoluta mediante metodi fisici o storici è così importante per completare il quadro cronologico.

Datazione Relativa e Ordinamenti Parziali nella Pratica Archeologica

La datazione relativa mediante analisi stratigrafica costituisce il fondamento cronologico dell'archeologia urbana. A differenza della datazione assoluta, che assegna date calendario specifiche agli eventi archeologici, la datazione relativa stabilisce soltanto l'ordine temporale degli eventi, senza necessariamente specificare quando essi siano effettivamente avvenuti. Questa distinzione è cruciale per comprendere i limiti e le potenzialità del metodo stratigrafico.

L'ordinamento parziale delle unità stratigrafiche può essere rappresentato graficamente mediante un diagramma di Hasse, che è essenzialmente equivalente a una Harris Matrix. In un diagramma di Hasse, i nodi rappresentanti unità più antiche sono collocati in posizioni più basse nel diagramma, mentre le unità più recenti occupano posizioni superiori. Gli archi connettono direttamente soltanto le coppie di nodi che hanno una relazione di copertura, ovvero dove un elemento è immediatamente superiore a un altro senza elementi intermedi.

La struttura di ordinamento parziale permette di definire concetti importanti come catene e antcatene. Una catena è un sottoinsieme di unità stratigrafiche totalmente ordinato, ovvero dove ogni coppia di elementi è confrontabile. Fisicamente, una catena corrisponde a una sequenza stratigrafica verticale ininterrotta, come potrebbe essere una successione di pavimenti sovrapposti in un ambiente chiuso. Un'antcatena, al contrario, è un sottoinsieme di elementi mutuamente incomparabili, ovvero unità che non hanno relazioni stratigrafiche tra loro e che potrebbero teoricamente essere contemporanee.

Il teorema di Dilworth, risultato fondamentale della teoria degli ordinamenti parziali, afferma che in un poset finito, la dimensione massima di un'antcatena è uguale al numero minimo di catene necessarie per coprire tutti gli elementi del poset. Nel contesto stratigrafico, questo teorema ha un'interpretazione concreta: il numero massimo di unità che potrebbero essere contemporanee corrisponde al numero minimo di sequenze stratigrafiche indipendenti necessarie per descrivere completamente il deposito archeologico.

Relazioni Stratigrafiche Fisiche e Loro Classificazione

Le relazioni stratigrafiche osservabili sul campo possono essere classificate in diverse categorie in base alla natura fisica del contatto tra le unità. La classificazione più comune distingue tra relazioni di sovrapposizione diretta, dove un'unità poggia fisicamente su un'altra, e relazioni di taglio, dove un'unità è stata asportata o interrotta dalla formazione di un'altra.

Le relazioni di sovrapposizione diretta sono le più semplici da interpretare. Un pavimento che copre un livello di terreno è chiaramente più recente del terreno sottostante. Un muro costruito sopra le fondazioni di un edificio precedente è posteriore a quelle fondazioni. In questi casi, la relazione temporale è evidente e non ambigua.

Le relazioni di taglio sono più complesse e richiedono un'attenzione particolare nell'interpretazione. Quando una fossa viene scavata attraverso strati preesistenti, l'interfaccia di taglio rappresenta un evento negativo, una sottrazione di materiale piuttosto che un'aggiunta. Edward Harris ha introdotto il concetto di unità stratigrafica negativa o interfaccia per descrivere questi eventi. L'interfaccia di taglio è più recente di tutte le unità che essa taglia, e più antica del riempimento che eventualmente colma la fossa. Questa relazione può essere formalizzata come: se U è un'unità tagliata dall'interfaccia I , che è riempita dal deposito R , allora $U < I < R$.

Un caso particolare di relazione stratigrafica è rappresentato dalle unità contemporanee o sincrone. Due unità sono considerate contemporanee quando sono state formate durante lo stesso evento costruttivo o deposizionale. Ad esempio, i diversi letti di malta e i corsi di mattoni che compongono una muratura omogenea possono essere considerati contemporanei, anche se tecnicamente la loro costruzione è avvenuta in momenti leggermente differenti. La contemporaneità stratigrafica è una relazione di equivalenza che partiziona l'insieme delle unità stratigrafiche in classi di equivalenza, ciascuna rappresentante un singolo evento cronologico.

La documentazione accurata delle relazioni stratigrafiche richiede l'uso di schede standardizzate dove ogni unità stratigrafica viene descritta in dettaglio, includendo attributi fisici, limiti spaziali, relazioni con le unità adiacenti e interpretazione funzionale. Le relazioni stratigrafiche vengono registrate specificando esplicitamente quali unità sono coperte, quali unità coprono, quali unità tagliano e quali unità sono tagliate dall'unità in esame. Questa documentazione sistematica costituisce la base empirica per la costruzione della Harris Matrix e per tutte le successive analisi cronologiche e interpretative.

GIS Stratigrafico Tridimensionale e Modellazione Spazio-Temporale della Stratificazione Urbana

GIS Tridimensionale Stratigrafico: Architetture Informative per la Gestione Volumetrica Multi-Temporale

I sistemi informativi geografici hanno rivoluzionato le pratiche di documentazione, analisi e gestione del patrimonio archeologico e architettonico, evolvendo da semplici strumenti di mappatura bidimensionale a piattaforme integrate per la gestione di informazioni spaziali complesse multidimensionali. L'applicazione del paradigma GIS alla stratigrafia urbana richiede estensioni concettuali e tecnologiche significative per accomodare la dimensione verticale della stratificazione edilizia e la dimensione temporale dell'evoluzione urbana, generando quello che può essere definito un GIS quadridimensionale o spazio-temporale.

L'architettura informativa di un GIS stratigrafico si fonda su modelli di dati capaci di rappresentare entità geometriche tridimensionali associate a metadati temporali. Le unità

stratigrafiche, che nei sistemi bidimensionali tradizionali venivano schematizzate come poligoni planari, vengono modellate come volumi solidi definiti da superfici di interfaccia tridimensionali. Diverse rappresentazioni geometriche sono possibili: modelli voxel, che discretizzano lo spazio in celle volumetriche regolari; modelli boundary representation, che descrivono i solidi mediante le loro superfici di contorno; modelli constructive solid geometry, che costruiscono geometrie complesse mediante operazioni booleane su primitive semplici; e modelli tetraedrici non strutturati, che tassellano lo spazio mediante mesh di tetraedri adattivi.

Ciascuna di queste rappresentazioni presenta vantaggi e limitazioni specifiche. I modelli voxel offrono semplicità computazionale e facilitano operazioni di analisi volumetrica come il calcolo di volumi occupati o l'identificazione di regioni con caratteristiche omogenee, ma soffrono di inefficienza nella rappresentazione di geometrie complesse e di approssimazione degli elementi architettonici a risoluzione limitata. I modelli boundary representation preservano accuratamente le superfici di interfaccia stratigrafica e si integrano naturalmente con tecnologie di acquisizione tridimensionale come il laser scanning e la fotogrammetria digitale, ma rendono più complesse operazioni volumetriche come l'intersezione di solidi. I modelli tetraedrici offrono flessibilità nella gestione di geometrie irregolari e permettono raffinamenti adattivi della risoluzione spaziale, risultando particolarmente adatti per applicazioni di modellazione numerica come la simulazione di processi fisici di degrado.

La dimensione temporale può essere incorporata in diverse architetture concettuali. L'approccio snapshot genera istantanee discrete dello stato del sistema a intervalli temporali selezionati, producendo una sequenza di configurazioni spaziali statiche. Questo approccio risulta intuitivo e facilita comparazioni dirette tra stati successivi, ma introduce discretizzazione temporale arbitraria e non rappresenta esplicitamente i processi di transizione. L'approccio event-based registra esplicitamente gli eventi che modificano la configurazione spaziale, associando a ciascuna entità geometrica una cronologia di eventi di creazione, modifica e distruzione. Questo approccio preserva informazione temporale ad alta risoluzione e permette di ricostruire lo stato del sistema a qualsiasi istante mediante l'aggregazione degli eventi precedenti, ma richiede strutture dati più complesse per gestire le genealogie delle entità.

Un modello particolarmente potente per rappresentare l'evoluzione spazio-temporale della stratificazione urbana è costituito dai simplicial complexes temporali. In questa formulazione, ogni unità stratigrafica viene rappresentata come un simpleso tridimensionale (tetraedro) esteso in una quarta dimensione temporale, generando un simpleso quadridimensionale che cattura simultaneamente l'estensione spaziale e la durata temporale dell'unità. Le relazioni stratigrafiche di anteriorità e posteriorità si traducono in relazioni topologiche tra semplessi adiacenti nella dimensione temporale. Questo framework fornisce una rappresentazione matematicamente rigorosa che si presta a tecniche analitiche derivate dalla topologia algebrica.

L'integrazione di dati provenienti da molteplici fonti di acquisizione costituisce una sfida significativa nella costruzione di GIS stratigrafici. Rilievi laser scanning terrestri e aeroportati generano nuvole di punti tridimensionali ad altissima densità che catturano la geometria superficiale degli edifici con precisione millimetrica. La fotogrammetria digitale Structure-from-Motion permette di ricostruire modelli tridimensionali texturizzati da collezioni

di fotografie sovrapposte, producendo rappresentazioni fotorealistiche dell'architettura esistente. Tecniche geofisiche non invasive come il georadar, le tomografie elettriche di resistività e le prospezioni magnetometriche forniscono informazioni sulla stratigrafia sepolta senza necessità di scavo. L'integrazione di questi dataset eterogenei richiede procedure di registrazione spaziale per allineare i diversi sistemi di coordinate, tecniche di fusione dei dati per combinare informazioni complementari, e algoritmi di riconciliazione per gestire discrepanze e inconsistenze.

Le operazioni analitiche che possono essere eseguite su GIS stratigrafici tridimensionali includono query spaziali complesse che interrogano le relazioni topologiche e metriche tra unità stratigrafiche. Queries di contenimento identificano tutte le unità contenute entro un volume specificato, utili per estrarre sotto-sequenze stratigrafiche relative a specifiche porzioni dell'edificio. Queries di prossimità identificano unità entro una distanza specificata da un punto o da un'altra unità, facilitando l'analisi di correlazioni spaziali. Queries temporali selezionano unità che esistevano in un intervallo temporale specificato, permettendo di ricostruire la configurazione dell'edificio in epoche passate.

Le analisi volumetriche calcolano metriche quantitative sulla stratificazione. Il calcolo dei volumi occupati da diverse tipologie di unità stratigrafiche quantifica l'entità relativa di diverse fasi costruttive. La distribuzione statistica delle orientazioni delle superfici stratigrafiche può rivelare preferenze nell'orientamento degli elementi costruttivi correlate a fattori funzionali, strutturali o simbolici. L'analisi della rugosità superficiale delle interfacce stratigrafiche può distinguere superfici di contatto originali da superfici generate da fenomeni diagenetici come l'erosione.

Le visualizzazioni tridimensionali e quadridimensionali costituiscono strumenti potenti per l'esplorazione e la comunicazione della complessità stratigrafica. Rendering volumetrici che mappano proprietà fisiche come densità o composizione chimica a schemi di colore o trasparenza permettono di visualizzare variazioni tridimensionali nelle caratteristiche dei materiali. Animazioni temporali che interpolano tra configurazioni successive illustrano dinamicamente i processi di trasformazione urbana. Ambienti di realtà virtuale immersivi permettono agli studiosi di navigare attraverso ricostruzioni tridimensionali degli edifici storici, esplorando configurazioni alternative e testando ipotesi interpretative mediante manipolazione interattiva.

Sezioni Stratigrafiche come Funzioni: Formalizzazione Matematica della Variazione Altimetrica

La concettualizzazione delle sezioni stratigrafiche come funzioni matematiche che mappano coordinate spaziali e temporali a quote altimetriche fornisce un framework formale potente per l'analisi quantitativa della stratificazione. Una sezione stratigrafica bidimensionale può essere rappresentata mediante una funzione $h(x,t)$ che esprime l'altezza del terreno o della superficie costruita in funzione della coordinata orizzontale x e del tempo t . Estendendo al caso tridimensionale, si ottiene una funzione $h(x,y,t)$ definita su un dominio spaziale bidimensionale e parametrizzata temporalmente.

La modellazione di queste funzioni richiede la scelta di rappresentazioni matematiche appropriate. Un approccio consiste nell'utilizzare espansioni in serie di funzioni di base. Per esempio, l'altezza può essere espressa come combinazione lineare di polinomi bivariati:

$$h(x,y,t) = \sum_i \sum_j a_{ij}(t) * x^i * y^j$$

dove i coefficienti $a_{ij}(t)$ variano nel tempo secondo l'evoluzione della stratificazione. Alternativamente, funzioni di base trigonometriche producono espansioni di Fourier bidimensionali:

$$h(x,y,t) = \sum_m \sum_n [a_{mn}(t) * \cos(2\pi * m * x / L_x + 2\pi * n * y / L_y) + b_{mn}(t) * \sin(2\pi * m * x / L_x + 2\pi * n * y / L_y)]$$

dove L_x e L_y definiscono le dimensioni del dominio. Le espansioni di Fourier risultano particolarmente utili per l'analisi spettrale della variazione altimetrica, identificando le scale spaziali dominanti della morfologia superficiale.

Funzioni di base radiali offrono un'alternativa flessibile particolarmente adatta per l'interpolazione di dati sparsi. La superficie può essere espressa come:

$$h(x,y,t) = \sum_k w_k(t) * \varphi(|(x,y) - (x_k, y_k)|)$$

dove φ è una funzione di base radiale come la gaussiana $\varphi(r) = \exp(-r^2 / 2\sigma^2)$ o la multiquadrica $\varphi(r) = \sqrt{r^2 + c^2}$, (x_k, y_k) sono le posizioni dei centri e $w_k(t)$ sono pesi variabili temporalmente. Questo approccio permette di costruire superfici continue che interpolano esattamente un insieme di punti di controllo derivati da osservazioni stratigrafiche.

Le splines bidimensionali, e in particolare le B-splines e le NURBS, forniscono rappresentazioni ancora più potenti che combinano flessibilità locale con continuità globale controllabile. Una superficie B-spline bicubica ha la forma:

$$h(x,y,t) = \sum_i \sum_j P_{ij}(t) * N_{i,3}(u) * N_{j,3}(v)$$

dove $P_{ij}(t)$ sono punti di controllo variabili temporalmente, $N_{i,3}$ e $N_{j,3}$ sono funzioni di base B-spline di grado tre, e (u,v) sono parametri ottenuti mappando le coordinate fisiche (x,y) . Le NURBS estendono le B-splines introducendo pesi razionali che permettono di rappresentare esattamente coniche e altre curve algebriche.

La dipendenza temporale dei parametri che definiscono queste superfici può essere modellata a sua volta mediante funzioni del tempo. Approcci semplici utilizzano interpolazione lineare o polinomiale tra configurazioni note a istanti discreti. Approcci più sofisticati modellano l'evoluzione mediante equazioni differenziali che catturano i processi fisici sottostanti. Per esempio, processi di deposizione sedimentaria possono essere descritti mediante equazioni di diffusione-advection:

$$\partial h / \partial t = D * \nabla^2 h - v \cdot \nabla h + S(x,y,t)$$

dove D è un coefficiente di diffusione che modella la dispersione laterale del sedimento, v è un campo di velocità che descrive il trasporto advettivo, e $S(x,y,t)$ è un termine sorgente che rappresenta il tasso locale di deposizione o erosione.

L'analisi differenziale di queste superfici fornisce insights geometrici sulla morfologia stratigrafica. Il gradiente $\nabla h = (\partial h/\partial x, \partial h/\partial y)$ indica la direzione di massima pendenza e può essere utilizzato per calcolare linee di flusso che identificano pattern di drenaggio superficiale. La curvatura della superficie, calcolata mediante le derivate seconde, distingue regioni convesse (curvatura positiva) da regioni concave (curvatura negativa) e identifica punti critici come picchi, avvallamenti e selle. Il laplaciano $\nabla^2 h = \partial^2 h/\partial x^2 + \partial^2 h/\partial y^2$ misura la divergenza del gradiente e si annulla nelle regioni di curvatura media nulla.

Le trasformate integrali forniscono strumenti potenti per l'analisi multiscale delle superfici stratigrafiche. La trasformata di Fourier bidimensionale decompone la superficie in componenti periodiche con diverse lunghezze d'onda, permettendo di separare variazioni su larga scala, che potrebbero riflettere topografie geologiche o impianti urbanistici, da variazioni su piccola scala associate a singoli elementi architettonici. La trasformata wavelet bidimensionale fornisce una decomposizione tempo-frequenza che preserva simultaneamente informazione sulla localizzazione spaziale e sulla scala di variazione, risultando particolarmente efficace per identificare discontinuità e anomalie localizzate.

L'incertezza nelle ricostruzioni delle superfici stratigrafiche può essere quantificata mediante approcci geostatistici. Il kriging ordinario fornisce non solo la migliore stima lineare non distorta dell'altezza in ogni punto, ma anche la varianza dell'errore di stima, permettendo di mappare la confidenza nella ricostruzione. Approcci bayesiani più sofisticati, come il kriging bayesiano o i Gaussian Process models, forniscono distribuzioni di probabilità complete sulla superficie, permettendo di quantificare l'incertezza in query complesse che coinvolgono multiple posizioni spaziali.

Modelli di Diffusione: Propagazione di Materiali e Stili attraverso il Tessuto Urbano

I processi di diffusione culturale e tecnologica costituiscono meccanismi fondamentali attraverso i quali innovazioni architettoniche, tecniche costruttive, materiali edilizi e stili decorativi si propagano spazialmente attraverso il tessuto urbano e temporalmente attraverso le generazioni. La modellizzazione matematica di questi processi mediante equazioni di diffusione fornisce un framework quantitativo per comprendere le dinamiche di adozione e disseminazione.

Il modello di diffusione più elementare è l'equazione del calore unidimensionale, che in contesto urbano può descrivere la propagazione di un'innovazione lungo un asse spaziale:

$$\partial u/\partial t = D * \partial^2 u/\partial x^2$$

dove $u(x,t)$ rappresenta la "concentrazione" o il grado di adozione dell'innovazione nella posizione x al tempo t , e D è il coefficiente di diffusione che quantifica la velocità di propagazione. La soluzione fondamentale di questa equazione, per una condizione iniziale concentrata in un punto, è una gaussiana che si allarga nel tempo:

$$u(x,t) = (1 / \sqrt{4\pi * D * t}) * \exp(-x^2 / (4 * D * t))$$

indicando che l'innovazione si diffonde dalla sorgente con una velocità caratteristica proporzionale a $\sqrt{D * t}$.

Estendendo al caso bidimensionale, appropriato per descrivere la diffusione nel piano urbano, si ottiene:

$$\partial u / \partial t = D * (\partial^2 u / \partial x^2 + \partial^2 u / \partial y^2) = D * \nabla^2 u$$

La soluzione per una sorgente puntiforme in due dimensioni è:

$$u(x,y,t) = (1 / (4\pi * D * t)) * \exp(-(x^2 + y^2) / (4 * D * t))$$

manifestando una diffusione radiale isotropa dalla sorgente.

Modelli più realistici incorporano anisotropia nella diffusione, riflettendo il fatto che la propagazione può essere facilitata lungo determinate direzioni, per esempio seguendo assi viari principali, e ostacolata in altre direzioni. Un tensore di diffusione anisotropo D_{ij} generalizza il coefficiente scalare:

$$\partial u / \partial t = \sum_i \sum_j \partial / \partial x_i (D_{ij} * \partial u / \partial x_j)$$

La struttura del tensore riflette le preferenze direzionali: autovalori grandi corrispondono a direzioni di diffusione rapida, autovalori piccoli a direzioni di diffusione lenta.

L'equazione di Fisher-KPP introduce un termine di reazione che modella la crescita logistica dell'adozione:

$$\partial u / \partial t = D * \nabla^2 u + r * u * (1 - u/K)$$

dove r è il tasso di crescita intrinseco e K è la capacità di carico. Questo modello genera fronti d'onda viaggianti che si propagano con velocità costante $v = 2 * \sqrt{D * r}$, rappresentando l'avanzamento dell'adozione attraverso il territorio.

Modelli discreti basati su automi cellulari offrono un'alternativa computazionale particolarmente adatta per incorporare eterogeneità spaziale e regole di transizione complesse. Il tessuto urbano viene discretizzato in celle, ciascuna caratterizzata da uno stato che può rappresentare l'adozione o meno di una particolare tecnologia o stile. Regole locali determinano le transizioni di stato in funzione degli stati delle celle vicine. Per esempio, una regola semplice potrebbe stabilire che una cella adotta un'innovazione se una frazione sufficientemente grande dei suoi vicini l'ha già adottata, implementando un meccanismo di pressione conformista.

La calibrazione di questi modelli di diffusione sui dati empirici derivati dall'archeologia urbana permette di stimare i parametri che governano i processi di propagazione. La distribuzione spaziale e temporale dell'adozione di specifiche tecniche costruttive, come l'introduzione della volta a crociera, la diffusione dell'uso del mattone, o l'adozione di particolari tipologie planimetriche, può essere confrontata con le predizioni dei modelli, permettendo di testare ipotesi sui meccanismi di diffusione e di quantificare le velocità di propagazione.

Un'applicazione particolarmente interessante riguarda la diffusione dei materiali edilizi. La disponibilità di datazioni radiometriche per campioni di legno strutturale, la caratterizzazione petrografica di materiali lapidei, e la tipologizzazione dei laterizi permettono di tracciare la diffusione di materiali specifici attraverso il territorio urbano. La comparazione di questi pattern empirici con predizioni di modelli di diffusione può discriminare tra diverse ipotesi sui meccanismi di approvvigionamento e distribuzione: diffusione radiale da cave centralizzate versus produzione distribuita locale, trasporto lungo reti fluviali o stradali versus trasporto omnidirezionale.

L'integrazione di modelli di diffusione con reti di interazione sociale genera framework più ricchi che catturano la struttura relazionale sottostante ai processi di propagazione. In questa formulazione, i nodi della rete rappresentano edifici o agenti costruttori, e gli archi rappresentano relazioni di influenza o scambio. La diffusione procede attraverso la rete secondo dinamiche che dipendono dalla topologia della rete: reti altamente connesse con distribuzione di grado eterogenea possono esibire soglie epidemiche ridotte, facilitando la diffusione rapida, mentre reti frammentate con molti cluster isolati rallentano la propagazione e possono generare adozioni regionalmente differenziate.

Network Analysis: Edifici come Nodi e Condivisione di Risorse come Archi

L'applicazione della teoria delle reti all'analisi del tessuto urbano storico fornisce strumenti potenti per comprendere le relazioni strutturali tra edifici e le dinamiche collettive che emergono da queste interconnessioni. In questa prospettiva, la città viene concettualizzata come un grafo nel quale i nodi rappresentano entità discrete, tipicamente edifici individuali, e gli archi rappresentano relazioni di varia natura: condivisione di materiali edilizi, impiego delle stesse maestranze, appartenenza alla medesima committenza, connessioni funzionali, prossimità spaziale, o somiglianza stilistica.

La costruzione di reti urbane storiche richiede l'identificazione sistematica di queste relazioni mediante l'integrazione di dati eterogenei. Documenti d'archivio come contratti di costruzione, pagamenti a maestranze, inventari di materiali forniscono evidenze dirette di connessioni tra edifici attraverso la condivisione di risorse umane e materiali. Analisi stilistiche e tipologiche identificano somiglianze morfologiche che possono riflettere influenze dirette o appartenenza a tradizioni costruttive comuni. Analisi archeometriche, come discusso precedentemente nel contesto degli spolia, identificano connessioni materiali attraverso la provenienza condivisa di elementi architettonici.

Una volta costruito il grafo, molteplici metriche derivate dalla teoria delle reti possono essere calcolate per caratterizzare sia proprietà globali della rete che proprietà locali di nodi individuali. Il grado di un nodo k_i conta il numero di connessioni dirette: edifici con grado elevato hanno interagito con molti altri edifici e potrebbero rappresentare hub influenti nella rete costruttiva. La distribuzione dei gradi $P(k)$, che specifica la frazione di nodi con grado k , caratterizza la struttura globale della rete. Molte reti reali, incluse reti sociali e tecnologiche, esibiscono distribuzioni di grado a legge di potenza $P(k) \propto k^{(-\gamma)}$, indicative di reti scale-free con pochi hub altamente connessi e molti nodi poco connessi.

La lunghezza del cammino più breve l_{ij} tra due nodi i e j misura il numero minimo di archi necessari a connettere i nodi. La lunghezza media del cammino più breve $L = (1 / (n * (n-1))) * \sum_i \sum_{j \neq i} l_{ij}$ quantifica quanto sia compatta la rete: valori bassi indicano che la maggior parte dei nodi può essere raggiunta da qualsiasi altro nodo attraverso pochi passi intermedi. Il diametro della rete $D = \max_{ij} l_{ij}$ rappresenta la massima distanza tra qualsiasi coppia di nodi.

Il coefficiente di clustering C_i di un nodo i misura la densità di connessioni tra i suoi vicini diretti. Se il nodo i ha k_i vicini e tra questi esistono E_i archi, allora $C_i = 2 * E_i / (k_i * (k_i - 1))$. Il coefficiente di clustering medio $C = (1/n) * \sum_i C_i$ quantifica la tendenza della rete a formare cluster densamente connessi. Reti con clustering elevato e lunghezza del cammino breve esibiscono proprietà di "small world", caratteristica di molte reti sociali e tecnologiche.

La centralità di intermediazione (betweenness centrality) di un nodo i quantifica quante volte il nodo appare nei cammini più brevi tra altre coppie di nodi: $b_i = \sum_{j \neq i, k \neq i, j \neq k} \sigma_{jk}(i) / \sigma_{jk}$, dove σ_{jk} è il numero totale di cammini più brevi tra j e k , e $\sigma_{jk}(i)$ è il numero di questi che passano per i . Nodi con alta betweenness fungono da ponti che controllano il flusso di informazione o risorse tra diverse regioni della rete.

La centralità di autovettore (eigenvector centrality) generalizza il concetto di grado assegnando importanza maggiore a connessioni con nodi già importanti. Definendo x_i come la centralità del nodo i , si ha $x_i = (1/\lambda) * \sum_j A_{ij} * x_j$, dove A è la matrice di adiacenza e λ è il più grande autovalore. Questa definizione ricorsiva implica che x è l'autovettore principale di A . Varianti includono il PageRank, utilizzato originariamente da Google per classificare pagine web.

La modularità della rete quantifica la presenza di struttura comunitaria, ossia la divisione della rete in gruppi di nodi densamente connessi internamente e debolmente connessi tra gruppi. Algoritmi di rilevamento delle comunità, come il Louvain method o lo spectral clustering, identificano partizioni che massimizzano la modularità. Nel contesto urbano, comunità potrebbero corrispondere a quartieri con tradizioni costruttive distintive, reti di committenza coerenti, o condivisione preferenziale di risorse entro gruppi socioeconomici specifici.

L'analisi di motifs identifica piccoli subgrafi ricorrenti che appaiono con frequenza statisticamente significativa nella rete. Per esempio, triangoli (tre nodi mutuamente connessi) potrebbero indicare collaborazioni trilaterali ricorrenti tra committenti, architetti e maestranze. Catene lineari potrebbero riflettere trasmissioni seriali di conoscenze attraverso apprendistati successivi.

La robustezza della rete a rimozioni di nodi può essere analizzata mediante simulazioni di attacco: nodi vengono rimossi sequenzialmente, secondo strategie casuali o mirate (ad esempio rimuovendo prima i nodi con grado più elevato), e si osserva l'impatto sulla connettività residua della rete. Reti scale-free sono tipicamente robuste a rimozioni casuali ma vulnerabili ad attacchi mirati contro hub. Nel contesto urbano, questo potrebbe modellare l'impatto di eventi catastrofici che distruggono edifici, con implicazioni per la resilienza delle reti di conoscenza e approvvigionamento.

Reti multi-layer o multiplexe, nelle quali molteplici tipologie di relazioni coesistono tra gli stessi nodi, forniscono rappresentazioni più ricche. Per esempio, un layer potrebbe rappresentare condivisione di maestranze, un altro condivisione di materiali, un terzo somiglianza stilistica. L'analisi delle correlazioni tra layer può rilevare se edifici connessi per una ragione tendono ad essere connessi anche per altre, suggerendo meccanismi di accoppiamento tra diverse dimensioni delle relazioni urbane.

Le reti temporali, nelle quali archi appaiono e scompaiono nel tempo, catturano l'evoluzione diacronica delle connessioni. Metriche temporali come la durata degli archi, i pattern di attivazione e disattivazione, e la velocità di propagazione di innovazioni attraverso la rete dinamica forniscono insights sui processi temporali che governano l'evoluzione urbana.

Persistent Homology: Caratteristiche Architettoniche che Attraversano i Secoli

La topologia algebrica, e in particolare la teoria dell'omologia persistente, fornisce strumenti matematici sofisticati per l'analisi delle caratteristiche morfologiche che persistono attraverso scale multiple e periodi temporali estesi. L'omologia persistente identifica e quantifica features topologiche come componenti connesse, cicli, e cavità in dati spaziali, tracciando la loro nascita e morte mentre si varia un parametro di scala o di filtrazione.

Nel contesto della morfologia urbana, l'omologia persistente può essere applicata per identificare configurazioni spaziali che mantengono stabilità attraverso trasformazioni storiche. Si considera il tessuto urbano come un complesso simpliciale, una generalizzazione di un grafo che include non solo nodi e archi ma anche triangoli, tetraedri e semplici di dimensioni superiori. Edifici possono essere rappresentati come nodi, strade come archi, isolati come facce bidimensionali.

La costruzione di una filtrazione associa a ogni semplice un valore reale che rappresenta il momento della sua apparizione. Per esempio, in una filtrazione temporale, ogni edificio, strada o isolato è etichettato con la sua data di costruzione. La filtrazione genera una sequenza annidata di complessi simpliciali $K_{t_1} \subseteq K_{t_2} \subseteq \dots \subseteq K_{t_n}$ corrispondenti a epoche successive, dove K_{t_i} include tutti i semplici esistenti al tempo t_i .

Per ogni complesso K_{t_i} nella filtrazione, si calcolano i gruppi di omologia $H_k(K_{t_i})$ in diverse dimensioni k . Il gruppo di omologia di dimensione zero H_0 conta le componenti connesse; H_1 identifica cicli unidimensionali (loops); H_2 identifica cavità bidimensionali. Crucialmente, l'omologia persistente traccia come questi gruppi evolvono attraverso la filtrazione, identificando features topologiche che nascono a un certo valore di filtrazione e muoiono a un valore successivo.

Un ciclo che nasce a t_b e muore a t_d ha persistenza $p = t_d - t_b$. Features con persistenza elevata rappresentano caratteristiche topologiche robuste che mantengono la loro integrità attraverso intervalli temporali estesi, mentre features con persistenza bassa potrebbero riflettere rumore o fluttuazioni transitorie. Nel contesto urbano, un ciclo persistente potrebbe corrispondere a un tracciato stradale circolare che si è mantenuto attraverso secoli di trasformazioni, indicando una forte inerzia morfologica.

I risultati dell'omologia persistente vengono tipicamente visualizzati mediante persistence diagrams o barcode diagrams. Un persistence diagram è un plot nel piano (nascita, morte) dove ogni feature topologica è rappresentata da un punto (t_b, t_d) . Features molto persistenti appaiono lontane dalla diagonale nascita = morte, mentre features poco persistenti appaiono vicine alla diagonale. Un barcode diagram rappresenta ogni feature come un segmento orizzontale che si estende da t_b a t_d , producendo un codice a barre che codifica compattamente l'informazione topologica multiscala.

Le metriche di distanza tra persistence diagrams permettono di quantificare similarità tra configurazioni topologiche. La bottleneck distance d_B tra due diagrams D_1 e D_2 è definita come:

$$d_B(D_1, D_2) = \inf_{\varphi} \sup_{x \in D_1} \|x - \varphi(x)\|_{\infty}$$

dove φ varia su tutte le bijezioni tra D_1 e D_2 , permettendo matching parziali con la diagonale. La Wasserstein distance generalizza la bottleneck utilizzando norme p diverse da infinito. Queste metriche trasformano lo spazio dei persistence diagrams in uno spazio metrico, abilitando tecniche statistiche e di machine learning.

Applicazioni dell'omologia persistente all'analisi urbana includono l'identificazione di pattern ricorrenti nella struttura viaria. Molte città storiche esibiscono reticoli di strade che formano cicli persistenti - anelli viari che si mantengono stabili attraverso secoli di trasformazioni edilizie. L'analisi di persistenza può distinguere tra cicli fondamentali che riflettono la geometria topologica essenziale della città e cicli accidentali che emergono temporaneamente da configurazioni contingenti.

Un esempio paradigmatico è costituito dalle cinte murarie urbane. Una cinta muraria forma topologicamente un ciclo unidimensionale che racchiude una regione bidimensionale. Quando la città si espande oltre le mura originarie e nuove cinte vengono costruite, il ciclo interno persiste come traccia morfologica anche dopo la demolizione fisica delle mura. L'omologia persistente può identificare questi cicli fantasma, rivelando palinsesti di espansioni successive stratificate nella topologia stradale contemporanea.

La filtrazione può essere definita non solo temporalmente ma anche in termini di scale spaziali. Una filtrazione basata su distanza, nota come Vietoris-Rips filtration, costruisce complessi simpliciali connettendo edifici che distano meno di un parametro ϵ crescente. Al variare di ϵ da zero a infinito, si osserva l'emergere e l'eventuale coalescenza di componenti connesse, la formazione di cicli quando gruppi di edifici circondano spazi vuoti, e la comparsa di cavità tridimensionali. Il persistence diagram risultante codifica informazioni sulla distribuzione spaziale multi-scala degli edifici.

L'omologia persistente multidimensionale estende il framework a filtrazioni parametrizzate da molteplici variabili. Ad esempio, si può filtrare simultaneamente per tempo e per tipologia costruttiva, tracciando come features topologiche emergono e persistono in sottospazi definiti da specifici periodi e tecnologie edilizie. La visualizzazione di questi risultati richiede rappresentazioni più complesse, come persistence surfaces o landscapes, che mappano le distribuzioni di persistenza a funzioni continue.

Le tecniche di machine learning topologico utilizzano features derivate da persistence diagrams come input per algoritmi di classificazione e clustering. Vettorizzazioni di persistence diagrams, come persistence images che discretizzano il piano nascita-morte in una griglia e assegnano pesi gaussiani ai punti, trasformano l'informazione topologica in vettori numerici compatibili con classificatori standard. Questi approcci permettono di identificare automaticamente configurazioni urbane topologicamente simili, cluster città con morfologie analoghe, o classificare quartieri basandosi sulla loro firma topologica persistente.

Building Archaeology: Alzati come Stratigrafia Verticale

Mentre l'archeologia tradizionale si concentra prevalentemente sugli strati orizzontali rivelati attraverso lo scavo, la building archaeology o archeologia dell'architettura applica i medesimi principi stratigrafici alle strutture in elevato. Le murature, le superfici intonacate, i pavimenti, le coperture costituiscono sequenze stratigrafiche verticali che documentano la biografia costruttiva degli edifici attraverso secoli di modifiche, ampliamenti, restauri e trasformazioni.

L'analisi stratigrafica degli alzati richiede la lettura attenta delle interfacce fisiche tra elementi costruttivi. Quando un muro si appoggia a un altro muro senza legatura strutturale, la giunzione costituisce un'interfaccia stratigrafica che indica che il muro appoggiato è posteriore al muro portante. Quando un'apertura viene tamponata, il riempimento è chiaramente più recente sia dell'apertura che del muro circostante. Quando una superficie intonacata copre una muratura, l'intonaco post-data necessariamente la costruzione del muro.

La documentazione sistematica degli alzati mediante ortofoto ad altissima risoluzione generate da fotogrammetria digitale Structure-from-Motion permette di produrre prospetti metrici accurati sui quali tracciare i limiti delle unità stratigrafiche murarie (USM). Ogni USM viene delimitata graficamente e descritta in schede standardizzate che registrano:

- **Materiali costitutivi:** tipologia di elementi (mattoni, pietre, blocchi), dimensioni, tessitura della muratura (opus quadratum, opus mixtum, apparecchio a corsi regolari o irregolari)
- **Legante:** malta, composizione, colore, consistenza, spessore dei giunti
- **Trattamento superficiale:** intonaco, finiture, tracce di strumenti
- **Relazioni stratigrafiche:** quali USM coprono, quali USM sono coperte, quali USM tagliano, quali USM sono tagliate
- **Interpretazione funzionale:** muro portante, divisorio, tamponamento, fondazione

La costruzione della matrice di Harris per le unità stratigrafiche murarie procede con gli stessi principi applicati agli strati di scavo. Il risultato è un diagramma che organizza le USM in sequenza cronologica relativa, permettendo di distinguere fasi costruttive successive e di ricostruire la sequenza diacronica delle trasformazioni edilizie.

Un aspetto particolarmente informativo dell'analisi degli alzati è costituito dallo studio delle tecniche costruttive e delle loro variazioni diacroniche. Diverse culture ed epoche hanno sviluppato modalità caratteristiche di assemblare murature:

- **Opus caementicium romano:** nucleo in conglomerato cementizio con paramenti in piccoli elementi regolari
- **Opus listatum altomedievale:** alternanza di corsi di mattoni e corsi di pietra
- **Apparecchio "a sacco" medievale:** due cortine murarie in pietra con riempimento interno in materiale incoerente
- **Muratura "a cassetta" rinascimentale:** paramenti in mattoni ben lavorati con nucleo in materiali meno pregiati

La presenza di specifiche tecniche costruttive fornisce indicatori cronologici relativi anche in assenza di datazioni assolute. Tuttavia, è fondamentale riconoscere che le tecniche costruttive possono persistere per periodi estesi e possono essere reimpiegate consapevolmente in contesti revivalistici, introducendo potenziali ambiguità interpretative.

Le discontinuità nelle murature rivelano eventi traumatici o modifiche progettuali. Lesioni, fratture, dislocazioni possono indicare terremoti o cedimenti fondazionali. Interruzioni improvvise nella tessitura muraria possono segnalare cambi di maestranza, interruzioni dei cantieri, o modifiche al progetto originario. L'identificazione sistematica di queste discontinuità contribuisce a ricostruire non solo la cronologia degli eventi costruttivi ma anche i processi sociali, economici e tecnologici che li hanno determinati.

Dendrocronologia Applicata a Travi: Sequenze Annuali e Cross-Dating

La dendrocronologia, scienza che studia la variazione degli anelli di crescita annuali negli alberi, fornisce uno dei metodi di datazione assoluta più precisi disponibili per l'archeologia e l'architettura storica. Nelle regioni temperate, gli alberi producono un nuovo anello di accrescimento ogni anno, con caratteristiche (spessore, densità, struttura cellulare) che riflettono le condizioni climatiche dell'anno di formazione. Anni favorevoli producono anelli spessi; anni sfavorevoli generano anelli sottili.

La sequenza degli spessori degli anelli costituisce una firma temporale unica che può essere confrontata con sequenze di riferimento (master chronologies) costruite assemblando e sovrapponendo misurazioni da alberi di età conosciuta, legni storici datati, e alberi subfossili. Il processo di cross-dating sincronizza la sequenza degli anelli di un campione di età ignota con la cronologia di riferimento, identificando la posizione temporale che massimizza la correlazione.

Matematicamente, il cross-dating può essere formalizzato come un problema di ottimizzazione. Sia $\{x_i\}$, $i = 1, \dots, n$ la sequenza degli spessori normalizzati degli anelli nel campione da datare, e $\{y_j\}$, $j = 1, \dots, m$ la cronologia di riferimento, con $m \gg n$. Si cerca l'offset temporale t^* che massimizza una funzione di similarità, tipicamente il coefficiente di correlazione di Pearson:

$$r(t) = (\sum_i (x_i - \bar{x})(y_{i+t} - \bar{y}_t)) / (\sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} \times \sqrt{\sum_i (y_{i+t} - \bar{y}_t)^2})$$

dove $\bar{x}$ e $\bar{y}_t$ sono le medie delle rispettive sequenze. L'offset ottimale $t^* = \operatorname{argmax}_t r(t)$ fornisce la datazione: se il campione termina con l'anello $i = n$ e questo corrisponde all'anello

$j = n + t^*$ nella cronologia di riferimento datato all'anno Y, allora il campione termina nell'anno Y.

La precisione della dendrocronologia è annuale: se un albero è stato abbattuto nella stagione vegetativa del 1423, l'ultimo anello completo si è formato nel 1422 e la datazione dendrocronologica fornirà 1422 come terminus post quem per l'utilizzo del legno. Considerando che il legno stagiona tipicamente alcuni mesi o anni prima dell'impiego costruttivo, la datazione dendrocronologica fornisce un'approssimazione molto stretta della data di costruzione.

L'applicazione architettonica richiede il campionamento di elementi lignei strutturali: travi di copertura, capriate, solai, travature portanti. Il campionamento è minimamente invasivo, estraendo carote cilindriche di pochi millimetri di diametro mediante trivelle speciali (carotatori di Pressler). Le carote vengono successivamente montate, levigate e analizzate al microscopio ottico per misurare gli spessori degli anelli con precisione micrometrica.

Le cronologie dendrocronologiche regionali coprono periodi estremamente estesi. Per la quercia europea, esistono cronologie continue che risalgono a oltre 12.000 anni fa, assemblate da legni subfossili conservati in paludi e torbiere. Per altre specie e regioni, le cronologie possono coprire alcuni secoli o millenni. La disponibilità di cronologie di riferimento adeguate è il prerequisito essenziale per la datazione dendrocronologica.

Oltre alla datazione, la dendrocronologia fornisce informazioni paleoclimatiche e paleoambientali. La variabilità interannuale degli spessori degli anelli riflette fluttuazioni climatiche: sequenze di anelli sottili indicano periodi di stress climatico (siccità, freddo estremo), mentre sequenze di anelli spessi indicano periodi favorevoli. Queste informazioni possono essere correlate con eventi storici documentati (carestie, crisi economiche) o con ricostruzioni climatiche indipendenti.

La dendroprovenance utilizza le caratteristiche delle sequenze dendrocronologiche per identificare l'origine geografica del legname. Alberi cresciuti in regioni diverse sviluppano pattern di crescita caratteristici riflettenti i climi regionali. Confrontando la sequenza dendrocronologica di un elemento architettonico con cronologie di riferimento provenienti da diverse regioni, è possibile inferire l'area di approvvigionamento del legname, fornendo insights sulle reti commerciali e sui sistemi di trasporto dei materiali edilizi.

Archeometria: XRF, Petrografia, Isotopi per Provenienza Materiali

L'archeometria applica metodologie analitiche delle scienze fisiche e chimiche allo studio dei materiali archeologici e architettonici, fornendo informazioni quantitative su composizione, provenienza, tecnologie di produzione e processi di degrado. Tre approcci sono particolarmente rilevanti per l'archeologia della stratificazione edilizia: la fluorescenza a raggi X (XRF), la petrografia, e l'analisi isotopica.

Fluorescenza a Raggi X (XRF)

La spettroscopia XRF è una tecnica analitica non distruttiva che determina la composizione elementale dei materiali mediante l'analisi della radiazione X fluorescente emessa quando il campione viene irradiato con raggi X primari. Gli atomi eccitati emettono radiazione X caratteristica con energie specifiche per ciascun elemento, permettendo l'identificazione e la quantificazione simultanea di elementi multipli.

Gli spettrometri XRF portatili (pXRF) permettono analisi in situ su elementi architettonici senza necessità di campionamento. Applicazioni includono:

- **Caratterizzazione di malte:** determinazione del rapporto legante/aggregato, identificazione di additivi (pozzolana, cocchiopesto), quantificazione di elementi traccia che possono indicare la provenienza dei materiali
- **Analisi di intonaci e pigmenti:** identificazione dei composti utilizzati per colorazioni (cinabro HgS per rossi, azzurrite $\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$ per azzurri, minio Pb_3O_4 per arancioni)
- **Caratterizzazione di vetri storici:** determinazione della composizione che può discriminare diverse tradizioni produttive (vetri sodico-calcici versus vetri potassico-calcici)
- **Analisi di metalli e leghe:** determinazione della composizione di bronzi architettonici, chiodi, elementi di fissaggio

L'analisi statistica multivariata dei dati XRF permette di classificare campioni e identificare gruppi composizionali. La Principal Component Analysis (PCA) riduce la dimensionalità dei dati composizionali multi-elementali, proiettando i campioni in uno spazio ridotto dove similarità e differenze diventano visualmente evidenti. Cluster di campioni nello spazio PCA possono corrispondere a provenienze comuni, tecnologie produttive simili, o periodi cronologici specifici.

Petrografia

L'analisi petrografica mediante microscopia ottica in luce polarizzata è la tecnica standard per caratterizzare materiali lapidei e ceramici. Sottili sezioni di roccia o ceramica, spesse tipicamente 30 μm , vengono osservate al microscopio permettendo l'identificazione dei minerali costitutivi, della tessitura, delle microstrutture e delle inclusioni.

Per i materiali lapidei naturali utilizzati in architettura (marmi, graniti, calcari, arenarie), la petrografia identifica:

- **Mineralogia:** quali minerali sono presenti e in quali proporzioni
- **Tessitura:** dimensione dei cristalli, forma, orientazione preferenziale
- **Microstrutture:** evidenze di deformazione, metamorfismo, alterazione diagenetica
- **Inclusioni e accessori:** minerali minori che possono essere diagnostici per specifiche provenienze

L'identificazione petrografica può spesso discriminare tra diverse cave o regioni estrattive. Marmi provenienti da Carrara mostrano caratteristiche tessiturali distintive rispetto a marmi greci di Paros o Penteli. Questa capacità di discriminazione è fondamentale per tracciare le reti commerciali dei materiali lapidei e per identificare episodi di reimpiego.

Per i materiali ceramici (mattoni, tegole, laterizi), la petrografia rivela:

- **Composizione dell'argilla:** minerali argillosi presenti, loro trasformazioni termiche
- **Degrassanti:** inclusioni aggiunte intenzionalmente (sabbia, chamotte) per migliorare proprietà meccaniche
- **Temperatura di cottura:** inferita dalle trasformazioni mineralogiche (comparsa di alte temperature fasi come mullite, gehlenite)
- **Tecnologia di produzione:** omogeneità dell'impasto, orientazione preferenziale delle particelle indicativa di foggatura al tornio versus modellatura manuale

La caratterizzazione petrografica sistematica di laterizi provenienti da diverse fasi costruttive di un edificio può rivelare variazioni nelle fonti di argilla, nelle tecnologie di produzione, e nelle temperature di cottura, fornendo insights sull'organizzazione produttiva e sulla sua evoluzione temporale.

Analisi Isotopica

Gli isotopi stabili e radiogenici forniscono traccianti geochimici potenti per determinare la provenienza dei materiali. Elementi diversi hanno applicazioni specifiche:

Strontio (Sr): I rapporti isotopici $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ nei materiali lapidei riflettono la geologia della regione di origine. Marmi estratti da formazioni geologiche di età diversa o con storie metamorfiche differenti esibiscono rapporti Sr distintivi. Database di riferimento compilati analizzando campioni di provenienza certa permettono di assegnare campioni di provenienza ignota confrontando i loro rapporti Sr.

Piombo (Pb): I rapporti tra gli isotopi ^{206}Pb , ^{207}Pb e ^{208}Pb variano in funzione dell'età e della composizione uranio-torio della mineralizzazione originaria. Diversi giacimenti minerari hanno firme isotopiche di piombo distintive. L'analisi isotopica di elementi architettonici in piombo (condutture, sigilli, coperture) o di pigmenti contenenti piombo (minio, biacca) può identificare la sorgente mineraria.

Ossigeno (O) e Carbonio (C): Nei marmi (CaCO_3), i rapporti isotopici $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^{13}\text{C}$ riflettono le condizioni di formazione del carbonato. Combinando le misurazioni di $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^{13}\text{C}$, molti marmi possono essere assegnati a specifiche cave. Questo approccio è stato applicato estensivamente per studiare la provenienza di marmi architettonici in contesti romani e greci.

Neodimio (Nd): Il rapporto $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$, combinato con Sr, fornisce un sistema di traccianti bi-dimensionale che aumenta la risoluzione nella discriminazione di provenienze. Applicato principalmente a ceramiche e laterizi.

Le analisi isotopiche richiedono strumentazione sofisticata (spettrometri di massa a ionizzazione termica TIMS, o a plasma accoppiato induttivamente ICP-MS) e campioni di massa tipicamente dell'ordine di milligrammi. Il campionamento è quindi più invasivo rispetto a tecniche completamente non-distruttive come pXRF, ma la risoluzione nella discriminazione di provenienze è spesso superiore.

L'integrazione di dati archeometrici multi-tecnica (XRF + petrografia + isotopi) fornisce caratterizzazioni robuste che difficilmente possono essere ottenute da singole tecniche. Pattern coerenti rilevati da tecniche indipendenti aumentano la confidenza nelle attribuzioni di provenienza e nelle ricostruzioni delle reti di approvvigionamento.

Analisi Spaziale, Morfogenesi Urbana e Modellazione Dinamica

Spatial Autocorrelation: Quartieri con Stili Costruttivi Simili in Cluster

La distribuzione spaziale delle caratteristiche architettoniche raramente è casuale. Edifici localizzati in prossimità spaziale tendono a condividere attributi simili - tecniche costruttive, materiali, stili decorativi, tipologie planimetriche - manifestando quello che in statistica spaziale viene definito autocorrelazione spaziale positiva: la tendenza di valori simili a concentrarsi nello spazio.

Questo fenomeno riflette molteplici meccanismi causali. La disponibilità localizzata di materiali edili favorisce l'uso di risorse prossime: quartieri vicini a cave di pietra utilizzano prevalentemente materiale lapideo, mentre aree fluviali con accesso a depositi argillosi privilegiano laterizi. Le reti sociali e professionali di maestranze operano tipicamente su scale spaziali limitate: un maestro muratore e i suoi apprendisti costruiscono edifici in un raggio geografico ristretto, trasferendo tecniche e stili coerenti. Le normative edilizie locali, quando esistenti, impongono uniformità in altezze, materiali, tipologie. I fattori socioeconomici si stratificano spazialmente: quartieri benestanti adottano materiali pregiati e architetture elaborate, mentre quartieri popolari utilizzano tecnologie costruttive economiche.

La quantificazione dell'autocorrelazione spaziale utilizza indici statistici specifici. L'indice di Moran I è la misura più comunemente impiegata. Per una variabile z_i osservata nelle n localizzazioni $i = 1, \dots, n$ (ad esempio, l'altezza degli edifici, la percentuale di facciata in laterizio, un indice di elaborazione stilistica), l'indice di Moran si calcola come:

$$I = (n / \sum_i \sum_j w_{ij}) \times (\sum_i \sum_j w_{ij} (z_i - \bar{z})(z_j - \bar{z})) / (\sum_i (z_i - \bar{z})^2)$$

dove $\bar{z}$ è la media della variabile e w_{ij} è un elemento della matrice dei pesi spaziali W che quantifica la "vicinanza" tra le localizzazioni i e j . La definizione di vicinanza può essere basata su contiguità ($w_{ij} = 1$ se i e j condividono un confine, 0 altrimenti), distanza inversa ($w_{ij} = 1/d_{ij}^\alpha$ dove d_{ij} è la distanza e α è un esponente), o k -nearest neighbors ($w_{ij} = 1$ se j è tra i k vicini più prossimi di i).

L'indice I varia tipicamente nell'intervallo $[-1, +1]$. Valori positivi significativi ($I > 0$) indicano autocorrelazione positiva: edifici simili si raggruppano. Valori negativi ($I < 0$) indicano dispersione: edifici dissimili tendono a essere vicini. Valori prossimi a zero suggeriscono distribuzione casuale. La significatività statistica viene valutata confrontando il valore osservato con la distribuzione nulla generata mediante permutazioni casuali.

Il correlogramma spaziale estende l'analisi calcolando I per diverse classi di distanza. Si suddividono le coppie di localizzazioni in bins secondo la loro distanza reciproca e si calcola

un indice di Moran separato per ciascun bin. Il correlogramma $I(d)$ in funzione della distanza d rivela la scala spaziale dell'autocorrelazione: distanze alle quali I decade a valori non significativi definiscono il range di influenza spaziale.

Il Local Indicator of Spatial Association (LISA) decompone l'autocorrelazione globale in contributi locali:

$$I_i = (z_i - \bar{z}) \times \sum_j w_{ij}(z_j - \bar{z})$$

permettendo di identificare cluster spaziali locali: hotspots dove edifici con valori elevati si concentrano, coldspots dove edifici con valori bassi si raggruppano, e outliers spaziali dove un edificio differisce significativamente dai suoi vicini. Mappe LISA visualizzano la distribuzione spaziale di questi pattern, rivelando la struttura interna della segregazione spaziale delle caratteristiche architettoniche.

L'analisi geostatistica mediante variogrammi fornisce un framework alternativo complementare. Il variogramma $\gamma(h)$ quantifica la varianza tra coppie di osservazioni separate dalla distanza h :

$$\gamma(h) = (1 / (2N(h))) \times \sum_{\{d_{ij} \approx h\}} (z_i - z_j)^2$$

dove $N(h)$ è il numero di coppie separate approssimativamente dalla distanza h . In presenza di autocorrelazione spaziale positiva, il variogramma cresce con la distanza: osservazioni vicine sono più simili (varianza piccola) rispetto a osservazioni lontane (varianza grande). Il variogramma satura tipicamente a un plateau (sill) corrispondente alla varianza complessiva della variabile, raggiunto a una distanza caratteristica (range) che definisce la scala di correlazione spaziale.

Modelli parametrici di variogramma (esponenziale, gaussiano, sferico, Matérn) vengono adattati ai variogrammi empirici mediante fitting, fornendo descrizioni compatte della struttura di correlazione spaziale. Questi modelli parametrici sono fondamentali per tecniche di interpolazione geostatistica come il kriging, che predice valori in localizzazioni non campionate sfruttando la correlazione spaziale.

Le applicazioni all'archeologia urbana sono molteplici. L'analisi dell'autocorrelazione spaziale di attributi edilizi può:

- Identificare quartieri omogenei caratterizzati da coerenza costruttiva interna
- Delimitare zone di transizione dove stili diversi coesistono
- Tracciare la diffusione spaziale di innovazioni tecnologiche quantificando come l'autocorrelazione per una tecnica specifica varia nel tempo
- Testare ipotesi sui meccanismi di segregazione spaziale confrontando pattern osservati con modelli nulli casuali

Morphogenesis Urbana: Come Piante Irregolari Emergono da Regole Locali

Le morfologie urbane storiche esibiscono frequentemente pattern complessi e apparentemente irregolari che contrastano nettamente con la geometria ordinata delle città

pianificate. Tracciati stradali tortuosi, isolati di forma irregolare, piazze asimmetriche caratterizzano molti centri storici europei e mediorientali. La comprensione di come queste configurazioni emergono richiede l'adozione di una prospettiva morfogenetica che focalizzi sui processi bottom-up attraverso i quali interazioni locali generano ordine globale.

I sistemi complessi auto-organizzanti forniscono il framework teorico appropriato. In questi sistemi, agenti interagenti secondo regole locali semplici producono pattern collettivi emergenti che non sono esplicitamente codificati nelle regole individuali. La città può essere concettualizzata come un sistema multi-agente dove proprietari, costruttori, autorità pubbliche prendono decisioni localizzate che, aggregate, generano la morfologia urbana osservabile.

Un modello elementare di morfogenesi urbana è costituito dal processo di aggregazione. Si considera una griglia bidimensionale inizialmente vuota eccetto per un nucleo centrale occupato (il seme urbano). Ad ogni passo temporale, una nuova cella viene aggiunta in una posizione adiacente al cluster esistente, scelta secondo una regola probabilistica che può incorporare fattori diversi:

- **Aggregazione puramente casuale:** ogni posizione adiacente al cluster ha probabilità uguale di essere occupata
- **Aggregazione limitata da diffusione (DLA):** particelle eseguono cammini casuali finché non collidono con il cluster, producendo strutture ramificate frattali
- **Aggregazione con preferenza per alta coordinazione:** posizioni con molti vicini già occupati hanno probabilità maggiore, favorendo compattezza

Varianti incorporate vincoli geografici (topografia, corsi d'acqua), attrattori (strade preesistenti, luoghi centrali), e barriere (mura, proprietà non edificabili). Le morfologie emergenti dipendono criticamente dalle regole adottate: aggregazione casuale produce forme compatte approssimativamente circolari; DLA genera strutture dendritiche con lunghe proiezioni; preferenza per coordinazione alta produce perimetri più lisci.

I modelli di packing bidimensionale esplorano come l'allocazione di parcelle edilizie genera pattern di divisione del territorio. Algoritmi di Voronoi partition assegnano a ciascun seme (che può rappresentare un punto di accesso stradale o un centro di proprietà) la regione contenente tutti i punti più vicini a quel seme rispetto agli altri semi. Le celle di Voronoi risultanti approssimano spesso isolati urbani reali, specialmente quando i semi sono distribuiti lungo una rete stradale preesistente.

La teoria delle reti fornisce strumenti per modellare la formazione delle reti stradali. Modelli di crescita preferenziale (preferential attachment) generano reti scale-free dove nuove strade tendono a connettersi a intersezioni già ben connesse, riproducendo distribuzioni di grado osservate in molte città storiche. Modelli di small-world combinano connessioni locali regolari con shortcut casuali a lungo raggio, catturando la coesistenza di struttura locale ordinata e connettività globale efficiente.

Un approccio particolarmente influente è costituito dalla space syntax, framework sviluppato da Bill Hillier negli anni '70 che analizza configurazioni spaziali urbane mediante grafi duali dove i nodi rappresentano spazi (strade, piazze) e gli archi rappresentano adiacenze. Metriche come integration e choice quantificano quanto ogni spazio è centrale nella

configurazione globale. Studi empirici hanno dimostrato correlazioni tra integrazione di strade e pattern di movimento pedonale, densità commerciale, e valore immobiliare.

Le regole di crescita urbana possono incorporare vincoli economici. Il modello di bid-rent formalizza come il valore del suolo decresce con la distanza dal centro economico. Agenti con diverse funzioni (residenziale, commerciale, industriale) competono per allocare terre secondo la loro willingness to pay, generando zonizzazione spaziale emergente: commercio nel centro ad alta accessibilità, residenze in periferia, industria in zone intermedie o periferiche con buon accesso a trasporti.

La calibrazione di questi modelli morfogenetici sui dati empirici permette di testare ipotesi sui processi storici. Se un modello con regole specifiche riproduce accuratamente pattern morfologici osservati, si ottiene evidenza indiretta che processi analoghi a quelli modellati potrebbero aver operato storicamente. Discrepanze tra predizioni e osservazioni suggeriscono la necessità di modificare le regole o di incorporare fattori aggiuntivi.

Fractal Dimension di Street Networks: Evoluzione da Medievale a Pianificata

Molte strutture naturali e artificiali esibiscono proprietà frattali: auto-similarità attraverso scale multiple, dimensioni frattali non intere, assenza di scala caratteristica. Le reti stradali urbane manifestano spesso caratteristiche frattali, specialmente quelle sviluppatesi attraverso crescita organica multi-secolare.

La dimensione frattale D quantifica come la complessità di una struttura scala con la risoluzione di osservazione. Per un oggetto frattale ideale, la relazione tra il numero di elementi N necessari a coprire la struttura e la dimensione caratteristica ϵ degli elementi segue una legge di potenza:

$$N(\epsilon) \propto \epsilon^{(-D)}$$

La dimensione frattale può essere determinata mediante diversi algoritmi. Il metodo box-counting suddivide lo spazio in una griglia regolare di celle di lato ϵ e conta il numero $N(\epsilon)$ di celle che contengono almeno un segmento della rete stradale. Ripetendo per valori decrescenti di ϵ e plottando $\log N(\epsilon)$ versus $\log \epsilon$, la pendenza della retta di regressione fornisce una stima di D .

Per reti stradali completamente bidimensionali e uniformemente dense, $D \approx 2$. Reti fortemente ramificate e rareficate hanno $D < 2$. Reti medievali sviluppatesi organicamente esibiscono tipicamente dimensioni frattali nell'intervallo $D \approx 1,6 - 1,8$, riflettendo strutture intermedie tra curve unidimensionali ($D = 1$) e superfici bidimensionali ($D = 2$). Reti pianificate moderne con griglie ortogonali regolari tendono verso $D \approx 2,0$, indicando occupazione spaziale più uniforme.

L'evoluzione diacronica della dimensione frattale può essere tracciata analizzando mappe storiche successive della stessa città. Un incremento progressivo di D riflette densificazione della rete stradale, riempimento di spazi interstiziali, regolarizzazione della geometria. Discontinuità nella traiettoria di D possono corrispondere a eventi di ripianificazione drastica,

distruzioni belliche seguite da ricostruzioni pianificate, o espansioni programmate oltre perimetri preesistenti.

Altre metriche derivate dalla geometria frattale includono:

Dimensione di correlazione: quantifica come il numero di coppie di punti della rete entro distanza r scala con r . Fornisce informazioni sulla clustering spaziale.

Dimensione di informazione: derivata dall'entropia della distribuzione spaziale, misura la complessità informativa della struttura.

Spettro multifrattale: generalizza la dimensione frattale singola a uno spettro di dimensioni $f(\alpha)$ che caratterizza l'eterogeneità della distribuzione spaziale. Strutture omogenee hanno spettri stretti; strutture fortemente eterogenee hanno spettri ampi.

L'analisi frattale può essere estesa dalla morfologia planare alla distribuzione altimetrica. Profili di skyline urbani, rappresentanti l'altezza degli edifici lungo transetti, possono esibire proprietà frattali. La rugosità dei profili, quantificata mediante dimensioni frattali, riflette l'eterogeneità delle altezze edilizie. Centri storici con alta variabilità altimetrica (alternanza di edifici bassi e torri) hanno profili più rugosi (D più elevato) rispetto a quartieri moderni con altezze uniformi.

Le implicazioni della struttura frattale sono molteplici. Dal punto di vista percettivo, morfologie frattali sono spesso giudicate esteticamente gradevoli, suggerendo una possibile preferenza evolutiva per pattern auto-simili. Funzionalmente, reti stradali frattali possono ottimizzare trade-off tra accessibilità locale e connettività globale. Ecologicamente, la complessità frattale influenza processi di dispersione termica, circolazione atmosferica urbana, e biodiversità in ecosistemi urbani.

Agent-Based Modeling: Simulare Crescita Urbana Bottom-Up

I modelli basati su agenti (ABM) costituiscono un paradigma computazionale per simulare sistemi complessi mediante la rappresentazione esplicita di entità individuali (agenti) che interagiscono secondo regole comportamentali specificate. Nel contesto urbano, gli agenti possono rappresentare residenti, proprietari terrieri, sviluppatori, autorità municipali, ciascuno dotato di attributi (ricchezza, preferenze, localizzazione) e capacità decisionali.

L'architettura generale di un ABM urbano comprende:

Agenti: entità autonome che percepiscono il loro ambiente locale, prendono decisioni secondo regole comportamentali, e agiscono modificando lo stato del sistema. Le regole possono essere deterministiche o stocastiche, semplici o complesse, e possono incorporare apprendimento e adattamento.

Ambiente: rappresentazione spaziale del territorio urbano, tipicamente discretizzato in celle (griglia) o parcelle (geometria vettoriale). L'ambiente mantiene informazioni sullo stato di occupazione, uso del suolo, infrastrutture, e fornisce il contesto spaziale per le interazioni.

Regole di interazione: specificano come agenti interagiscono tra loro e con l'ambiente. Interazioni possono essere dirette (negoziazioni tra compratori e venditori) o mediate (competizione per risorse limitate).

Scheduler: determina l'ordine e la frequenza con cui agenti agiscono. Scheduling sincrono aggiorna tutti gli agenti simultaneamente; scheduling asincrono aggiorna agenti sequenzialmente, introducendo effetti d'ordine.

Un esempio paradigmatico è il modello di Schelling per la segregazione residenziale. Agenti di due tipologie (che possono rappresentare etnie, classi socioeconomiche) occupano una griglia bidimensionale. Ciascun agente valuta la composizione del suo vicinato locale e, se la frazione di vicini del proprio tipo scende sotto una soglia di tolleranza τ , si reloca in una cella vuota casuale. Sorprendentemente, anche con valori di τ relativamente bassi (ad esempio $\tau = 0,3$, indicando che l'agente è soddisfatto con solo 30% di vicini simili), il sistema evolve verso configurazioni fortemente segregate con cluster omogenei spazialmente estesi. Questo dimostra come preferenze individuali moderate possono generare segregazione collettiva estrema.

Estensioni del modello di Schelling incorporano:

- Valutazioni economiche: agenti valutano non solo composizione etnica ma anche prezzi immobiliari, accessibilità a servizi, qualità ambientale
- Vincoli di mobilità: non tutti gli agenti possono relocarsi liberamente; vincoli economici limitano le opzioni
- Reti sociali: decisioni di localizzazione influenzate da posizioni di amici e parenti

Modelli ABM di sviluppo urbano simulano processi di densificazione e espansione. Developers agenti valutano profittabilità di progetti edilizi in diverse localizzazioni, considerando costi di costruzione, prezzi di vendita attesi, regolamentazioni zonali. Decidono se, dove e cosa costruire (residenziale, commerciale, alta/bassa densità). Acquirenti agenti cercano proprietà che massimizzano la loro utilità dato budget constraints. Dinamiche di domanda e offerta emergono dall'aggregazione di decisioni individuali, generando pattern spaziali di sviluppo, cicli di boom-bust, gentrification.

Modelli di traffico multi-agente simulano movimenti di veicoli o pedoni. Ciascun agente rappresenta un viaggiatore con origine, destinazione e modalità di trasporto. Agenti scelgono percorsi ottimizzando tempo di viaggio, costo, o combinazioni. Interazioni tra agenti (congestione) influenzano i tempi di viaggio, creando feedbacks che modificano scelte di routing. Queste simulazioni informano progettazione infrastrutturale e politiche di gestione del traffico.

L'implementazione computazionale utilizza piattaforme dedicate come NetLogo, MASON, Repast. Queste forniscono framework per definire agenti, ambienti, schedulers, e visualizzazione dinamica. Le simulazioni sono tipicamente stocastiche, incorporando casualità nelle decisioni individuali e nelle sequenze di eventi. Risultati vengono analizzati mediante repliche multiple per quantificare variabilità e confidenza.

La calibrazione di ABM su dati empirici è metodologicamente sfidante. Lo spazio dei parametri (attributi agenti, soglie decisionali, pesi nelle funzioni di utilità) è tipicamente ad alta dimensionalità. Tecniche di calibrazione includono:

- **Pattern-oriented modeling:** parametri vengono selezionati per riprodurre pattern empirici multipli simultaneamente
- **Genetic algorithms:** ottimizzazione evolutiva esplora lo spazio dei parametri cercando configurazioni che minimizzano discrepanze tra simulazioni e dati
- **Approximate Bayesian Computation (ABC):** framework statistico per inferenza bayesiana in modelli dove la likelihood è intrattabile

La validazione richiede confronti tra predizioni del modello e osservazioni indipendenti. Idealmente, il modello calibrato su un periodo temporale dovrebbe predire accuratamente evoluzioni in periodi successivi. Discrepanze persistenti suggeriscono incompletezza del modello o omissione di processi rilevanti.

ABM offrono vantaggi unici per l'archeologia urbana. Permettono di esplorare controfattuali: simulare evoluzioni alternative sotto assunzioni diverse. Facilitano l'integrazione di evidenze eterogenee: dati archeologici, storici, ambientali possono informare diversi aspetti del modello. Generano insights sui meccanismi causali: identificando quali regole e parametri sono necessari e sufficienti a riprodurre pattern osservati.

Modellazione Cronologica Bayesiana e Reti di Materiali

Bayesian Chronological Modeling: Combinare Vincoli Stratigrafici e Date Radiometriche

La costruzione di cronologie archeologiche robuste richiede l'integrazione sistematica di informazioni eterogenee: sequenze stratigrafiche che forniscono ordinamenti relativi, datazioni radiometriche che forniscono stime assolute con incertezze quantificate, conoscenze a priori derivate da contesti storici o tipologie artefattuali. Il framework bayesiano fornisce il paradigma statistico formale per sintetizzare queste informazioni multiple in distribuzioni di probabilità coerenti sulle cronologie.

Il teorema di Bayes esprime come la probabilità di un'ipotesi H dato un insieme di osservazioni D si relaziona alla probabilità delle osservazioni dato l'ipotesi:

$$P(H | D) = P(D | H) \times P(H) / P(D)$$

dove:

- $P(H | D)$ è la distribuzione a posteriori sull'ipotesi dato i dati
- $P(D | H)$ è la verosimiglianza dei dati dato l'ipotesi
- $P(H)$ è la distribuzione a priori sull'ipotesi prima di osservare i dati
- $P(D)$ è la probabilità marginale dei dati (costante di normalizzazione)

Nel contesto cronologico, le ipotesi H sono le date degli eventi archeologici (costruzione di un edificio, deposizione di uno strato, abbandono di un livello), e i dati D includono datazioni radiometriche e vincoli stratigrafici.

Una datazione radiometrica tipica (ad esempio, radiocarbonio ^{14}C) fornisce una stima dell'età con incertezza gaussiana: $t = t_0 \pm \sigma$. Questo corrisponde a una likelihood gaussiana:

$$P(t_{\text{misurato}} | t_{\text{vero}}) \propto \exp(-(t_{\text{misurato}} - t_{\text{vero}})^2 / (2\sigma^2))$$

che esprime la probabilità di osservare la misura t_{misurato} se l'età vera è t_{vero} .

I vincoli stratigrafici impongono ordinamenti: se lo strato A sottostà allo strato B , allora $t_A < t_B$. Questi vincoli traducono in prior constraints che assegnano probabilità zero a configurazioni cronologiche che violano l'ordinamento:

$$P(t_A, t_B | A < B) = 0 \text{ se } t_A \geq t_B \quad P(t_A, t_B | A < B) \propto \text{costante se } t_A < t_B$$

L'integrazione avviene costruendo un modello cronologico bayesiano che combina tutte le likelihood e tutti i prior constraints. La distribuzione a posteriori congiunta su tutte le date degli eventi viene campionata mediante algoritmi di Markov Chain Monte Carlo (MCMC), generando migliaia di configurazioni cronologiche coerenti con tutti i vincoli. La distribuzione marginale per ciascun evento si ottiene proiettando la distribuzione congiunta sull'asse temporale di quell'evento.

Software specializzati come OxCal e BCal implementano questi algoritmi. L'utente specifica il modello mediante una sintassi che descrive:

- **Phases:** gruppi di eventi considerati approssimativamente contemporanei
- **Sequences:** serie di eventi ordinati cronologicamente
- **Boundaries:** limiti temporali che delimitano fasi
- **Dates:** misurazioni radiometriche con le loro incertezze

Per datazioni al radiocarbonio, un passaggio preliminare essenziale è la calibrazione: conversione di età radiocarboniche (esprese in anni radiocarbonio BP, Before Present = 1950 CE) in età di calendario. La necessità di calibrazione deriva dalla variabilità temporale della concentrazione atmosferica di ^{14}C , causata da fluttuazioni nel tasso di produzione cosmogenica e nel ciclo del carbonio. Curve di calibrazione internazionali (IntCal per emisfero nord, SHCal per sud, Marine per oceani) sono state costruite mediante misurazioni di ^{14}C su campioni dendrocronologicamente datati, coralli uranio-torio datati, varve lacustri.

La calibrazione trasforma una distribuzione gaussiana in età radiocarbonio in una distribuzione generalmente multimodale in età di calendario, a causa di plateaux e wiggles nella curva di calibrazione. L'integrazione bayesiana può affinare queste distribuzioni calibrate sfruttando vincoli stratigrafici: se due campioni stratigraficamente ordinati producono intervalli calibrati sovrapposti, il modello bayesiano modificherà le distribuzioni a posteriori per rispettare l'ordinamento, tipicamente spostando la distribuzione del campione inferiore verso età maggiori e quella del superiore verso età minori.

Un concetto potente è quello di **termini ante quem e post quem**. Un evento fornisce un terminus post quem (limite dopo il quale) per eventi successivi: se una trave viene datata

dendrocronologicamente al 1423 CE, la costruzione dell'edificio che la incorpora deve essere ≥ 1423 . Similmente, un evento fornisce un terminus ante quem (limite prima del quale) per eventi precedenti.

I modelli cronologici bayesiani possono incorporare informazioni supplementari:

- **Outlier analysis:** alcune datazioni possono essere affette da contaminazione o errori. Modelli con componenti outlier assegnano probabilità a priori che ciascuna datazione sia inlier (affidabile) o outlier (da escludere), aggiornando queste probabilità a posteriori basandosi sulla coerenza con altre datazioni e vincoli.
- **Tempo di deposizione:** alcune datazioni misurano eventi di formazione del materiale (crescita di un albero, vita di un organismo) che precedono l'evento archeologico di interesse (utilizzo della trave, deposizione delle ossa). Il lag può essere modellato come variabile stocastica con distribuzione a priori appropriata.
- **Duration constraints:** alcune fasi hanno durate note o stimate. Ad esempio, una fase di costruzione intensiva potrebbe essere vincolata a durare 5-15 anni basandosi su tassi di costruzione empirici.

Le distribuzioni a posteriori forniscono non solo stime puntuali (mediane, mode) ma anche quantificazione rigorosa dell'incertezza mediante intervalli credibili. Un intervallo credibile al 95% $[t_1, t_2]$ implica che, dato il modello e i dati, esiste una probabilità del 95% che l'evento sia avvenuto tra t_1 e t_2 .

Le applicazioni all'archeologia della stratificazione edilizia sono estensive. Un edificio multi-fase con sequenze stratigrafiche complesse e datazioni multiple (radiocarbonio su malte, dendrocronologia su travi, termoluminescenza su laterizi) può essere integrato in un singolo modello bayesiano che produce una cronologia coerente di tutte le fasi costruttive, con incertezze realistiche che riflettono sia le incertezze delle datazioni individuali sia i vincoli forniti dall'ordinamento stratigrafico.

Spolia e Reimpiego: Grafi di Connessione Materiali tra Epoche

Il fenomeno dello spoglio architettonico - il sistematico riutilizzo di elementi costruttivi provenienti da edifici precedenti in nuove costruzioni - costituisce una pratica ubiquitaria nell'architettura storica, particolarmente prevalente nei periodi di transizione culturale, crisi economica, o trasformazione urbana. Colonne, capitelli, basi, architravi, blocchi lapidei lavorati estratti da templi classici vengono reimpiegati in chiese paleocristiane e medievali. Laterizi romani vengono incorporati in murature altomedievali. Elementi decorativi rinascimentali trovano nuova vita in edifici barocchi.

L'analisi sistematica degli spolia richiede la concettualizzazione delle relazioni materiali tra edifici come un grafo diretto temporale. I nodi del grafo rappresentano edifici, e gli archi orientati rappresentano trasferimenti di materiali: un arco dal nodo A al nodo B indica che materiale originariamente appartenente all'edificio A è stato incorporato nell'edificio B. L'orientamento riflette la direzione temporale: A deve essere anteriore o contemporaneo a B.

La costruzione empirica di questi grafi richiede l'identificazione e la caratterizzazione degli spolia. Metodi includono:

Analisi stilistica e tipologica: elementi architettonici esibiscono caratteristiche stilistiche diagnostiche di specifici periodi. Un capitello corinzio di stile augusteo riutilizzato in una chiesa del VI secolo CE è riconoscibile per proporzioni, lavorazione, dettagli ornamentali.

Analisi petrografica e archeometrica: la caratterizzazione dei materiali lapidei mediante petrografia, geochimica, isotopi permette di identificare provenienze comuni. Colonne provenienti dalla stessa cava o dallo stesso edificio originario esibiscono composizioni coerenti.

Marchi di cava e iscrizioni: elementi lapidei possono recare marchi di estrazione, numeri di assemblaggio, o iscrizioni che forniscono informazioni dirette sulla provenienza.

Evidenze documentarie: contratti, inventari, descrizioni storiche possono registrare esplicitamente episodi di spoglio.

Una volta costruito il grafo degli spolia, diverse metriche network possono essere calcolate. Il **grado out** di un nodo (numero di archi uscenti) quantifica quanti edifici successivi hanno ricevuto materiale da quell'edificio: edifici con out-degree elevato sono stati fonti prolifici di materiali di spoglio. Il **grado in** (numero di archi entranti) quantifica quanti edifici precedenti hanno contribuito materiali: edifici con in-degree elevato sono stati costruiti assemblando spolia da fonti multiple.

I **cammini** nel grafo tracciano genealogie di materiali attraverso sequenze di reimpieghi successivi. Un cammino $A \rightarrow B \rightarrow C$ indica che materiale originariamente in A è stato reimpiegato in B, e successivamente trasferito da B a C. La lunghezza dei cammini misura il numero di cicli di reimpiego. Materiali che attraversano molti cicli dimostrano eccezionale resilienza e valore percepito.

Le **componenti fortemente connesse** identificano cluster di edifici tra i quali esistono cammini diretti bidirezionali, indicando reti chiuse di circolazione di materiali. Le **componenti debolmente connesse** identificano cluster connessi ignorando le direzioni degli archi, rivelando sistemi di edifici collegati da trasferimenti materiali in qualche direzione.

L'analisi temporale integra le datazioni degli edifici. Se i nodi sono etichettati con date di costruzione, si possono calcolare distribuzioni di **tempi di trasferimento**: intervalli tra la costruzione dell'edificio sorgente e la costruzione dell'edificio destinatario. Distribuzioni con picchi a intervalli brevi suggeriscono spoglio immediato (demolizione contestuale alla nuova costruzione). Distribuzioni con code lunghe indicano che materiali rimanevano disponibili per periodi estesi, forse in depositi organizzati.

I modelli di diffusione su grafi di spolia descrivono come specifiche tipologie di elementi si propagano attraverso la rete. Se un particolare tipo di capitello compare inizialmente in edifici $A_1, A_2, \dots$, e successivamente in edifici $B_1, B_2, \dots$ collegati per spoglio, la diffusione può essere tracciata e modellata. Parametri come tassi di adozione, probabilità di trasferimento lungo archi, e influenza della prossimità spaziale possono essere stimati.

Le implicazioni economiche e sociali sono profonde. Spolia riduce costi di costruzione evitando estrazione, trasporto, lavorazione di nuovi materiali. Ma il reimpiego di elementi prestigiosi (colonne imperiali romane in chiese) trasferisce anche capitale simbolico, conferendo legittimità e continuità. L'analisi network degli spolia può rivelare asimmetrie di potere: chi ha accesso preferenziale a edifici di alto status per spoglio? Autorità ecclesiastiche, élite laiche, sviluppatori municipali?

Pattern spaziali di spolia informano sulla logistica dei materiali. La distribuzione delle distanze tra nodi collegati da archi quantifica quanto lontano materiali viaggiavano tipicamente. Clustering spaziale di archi suggerisce che spoglio operava prevalentemente su scale locali, minimizzando costi di trasporto. Archi a lunga distanza indicano trasferimenti eccezionali motivati da valore straordinario del materiale o da committenze potenti.

Palimpsest Analysis: Strati di Occupazione, Interruzioni e Inversioni

Il concetto di palinsesto, originariamente riferito a manoscritti medievali raschiati e riscritti multipliamente, fornisce una metafora potente per la stratificazione urbana. Le città sono palinsesti architettonici dove testi costruttivi successivi si sovrappongono, cancellando parzialmente ma mai completamente i testi precedenti. La lettura del palinsesto urbano richiede tecniche che disambiguino i contributi delle diverse epoche e che riconoscano le complessità introdotte da processi di riscrittura.

La sequenza ideale stratigrafica è una successione regolare di strati ordinati cronologicamente senza discontinuità: ogni strato è depositato immediatamente sopra il precedente. Realtà archeologiche urbane esibiscono frequentemente deviazioni da questo ideale:

Hiatus (iati): interruzioni nella sedimentazione rappresentanti periodi durante i quali non si è depositato materiale, o durante i quali materiale depositato è stato successivamente eroso. Iati possono riflettere abbandoni temporanei di siti, periodi di non-costruzione, o eventi erosivi (alluvioni, demolizioni). Identificazione di iati richiede evidenze di superfici esposte prolungatamente (weathering, bioturbazione, paleosuoli).

Inversioni stratigrafiche: situazioni dove materiale più recente si trova fisicamente sotto materiale più antico, violando apparentemente la legge di sovrapposizione. Inversioni possono risultare da processi post-deposizionali che disturbano sequenze originarie:

- **Scavi moderni:** buche per fondazioni, trincee per utilities tagliano strati antichi e vengono riempite con materiale contenente artefatti recenti, creando depositi recenti in profondità
- **Riporti intenzionali:** terrazzamenti artificiali trasportano materiale da una località a un'altra, depositando materiale antico sopra superfici più recenti
- **Fenomeni naturali:** frane, colluviation, bioturbazione possono mescolare o invertire sequenze

Il riconoscimento di inversioni è cruciale per evitare interpretazioni cronologiche errate. Indicatori includono incongruenze tra datazioni e posizioni stratigrafiche, discontinuità nei confini stratigrafici, presenza di interfacce di taglio.

Truncations: rimozione parziale o totale di strati superiori mediante erosione o attività antropiche. Sequenze troncate preservano solo fasi iniziali, con perdita di informazione su fasi successive. Riconoscimento richiede identificazione di superfici di troncamento (interfaces) che tagliano strati sottostanti.

Residuality e intrusion: oggetti possono non essere contemporanei allo strato che li contiene. **Residual objects** sono artefatti derivati da contesti più antichi e reincorporati in depositi più recenti (ad esempio, ceramica frammentata da strati più antichi trasportata e ridepositata). **Intrusive objects** sono materiali più recenti che penetrano strati più antichi (ad esempio, radici, tane animali, oggetti caduti in fessure).

La modellazione matematica dei palinsesti utilizza formalismi derivati dalla teoria dell'informazione e dal signal processing. Si concettualizza la configurazione osservata S_{obs} come risultato di un processo di formazione che trasforma una configurazione originaria S_{orig} :

$$S_{obs} = F(S_{orig}, P_{post})$$

dove F è una funzione di trasformazione determinata da processi post-deposizionali P_{post} . L'obiettivo dell'analisi palimpsestica è invertire questa trasformazione per inferire S_{orig} dato S_{obs} e modelli di P_{post} .

Approcci bayesiani assegnano distribuzioni di probabilità su configurazioni originarie compatibili con osservazioni e con modelli di processi post-deposizionali. Simulazioni Monte Carlo esplorano lo spazio delle configurazioni possibili, generando ensembles di ricostruzioni alternative che rispettano vincoli osservazionali.

L'analisi di sequenze stratigrafiche multi-proxy integra dati eterogenei per riconoscere discontinuità:

- **Geochimica:** variazioni brusche in composizione elementare segnalano cambi di sorgente sedimentaria
- **Magnetismo:** variazioni in suscettibilità magnetica riflettono cambi in contenuto minerale
- **Granulometria:** cambi in distribuzione dimensionale dei grani indicano cambi in energia deposizionale
- **Biostratigrafia:** cambi in assemblaggi di pollini, diatomee, foraminiferi segnalano cambi ambientali o iati

Tecniche di **segmentation** automatizzata dividono sequenze stratigrafiche in segmenti omogenei internamente ma distinti tra segmenti adiacenti. Algoritmi di change-point detection identificano posizioni dove proprietà statistiche cambiano significativamente. Hidden Markov Models modellano sequenze come generati da stati latenti che transizionano probabilisticamente, con ciascuno stato caratterizzato da distribuzione di proprietà osservabili.

L'integrazione di evidenze stratigrafiche, archeometriche, storiche fornisce ricostruzioni robuste delle sequenze di occupazione. La presenza documentata di un incendio nel 1452 CE fornisce un marker temporale che può essere correlato con strati di combustione

archeologicamente identificati. Discontinuità nell'assemblaggio ceramico coerenti con transizioni stilistiche conosciute rafforzano interpretazioni cronologiche.

Storie Ramificate, Controfattuali e Sintesi Metodologica

Counterfactuals: Storie Ramificate e Scenari Alternativi

La storia urbana osservata rappresenta una singola traiettoria attraverso uno spazio vastissimo di possibili evoluzioni alternative. Eventi contingenti - incendi devastanti, terremoti, epidemie, decisioni politiche, innovazioni tecnologiche - determinano biforcazioni dove la storia poteva procedere lungo direzioni radicalmente differenti. L'analisi controfattuale esplora sistematicamente queste storie alternative non realizzate, interrogando: "Cosa sarebbe accaduto se...?"

La riflessione controfattuale non è meramente speculativa. Serve molteplici funzioni epistemologiche:

Identificazione di causalità: Per affermare che l'evento X causò l'outcome Y, dobbiamo sostenere che, in assenza di X, Y non si sarebbe verificato. La formulazione controfattuale "Se X non fosse accaduto, allora Y non sarebbe accaduto" è essenziale per distinguere associazioni causali da correlazioni spurie.

Valutazione di meccanismi: Simulando scenari alternativi dove specifici meccanismi causali vengono disabilitati o modificati, possiamo valutare la loro importanza relativa nel determinare outcomes osservati.

Quantificazione di path-dependency: Sistemi fortemente path-dependent sono sensibili a condizioni iniziali e a perturbazioni precoci; piccole variazioni iniziali generano traiettorie divergenti. Sistemi poco path-dependent convergono verso configurazioni simili indipendentemente da perturbazioni.

Testing di modelli: Modelli teorici di processi urbani producono predizioni controfattuali testabili. Se un modello afferma che fattore X è determinante, allora scenari controfattuali eliminando X dovrebbero produrre outcomes radicalmente differenti.

La formalizzazione matematica utilizza il framework dei **branching histories** o alberi decisionali. Il tempo è rappresentato come una struttura ad albero dove il tronco è il passato comune, e ogni biforcazione rappresenta un evento stocastico o una decisione che genera rami alternativi. Ogni ramo corrisponde a una storia possibile. La storia osservata è un singolo cammino dalla radice a una foglia.

Matematicamente, si definisce uno spazio di stati S e una funzione di transizione T che mappa stati correnti e eventi a stati successivi:

$$s_{t+1} = T(s_t, e_t)$$

dove s_t è lo stato al tempo t ed e_t è l'evento al tempo t . Eventi possono essere deterministici o stocastici, estratti da distribuzioni di probabilità:

$$e_t \sim P(e \mid s_t, \theta)$$

dove θ parametrizza i processi causali. Modificando θ o intervenendo direttamente su specifici eventi e_t , si generano traiettorie controfattuali.

Caso di Studio: L'Incendio di Londra (1666)

Il Great Fire of London del settembre 1666 distrusse approssimativamente 13.200 case, 87 chiese parrocchiali, la Cattedrale di St. Paul, e gran parte delle strutture medievali della City. La ricostruzione seguì principi parzialmente pianificati, con regolamentazioni che imposero uso di mattoni e pietra al posto di legno, allargamento di strade, modifiche al tessuto viario.

Scenario osservato: La City di Londra post-1666 presenta morfologia mista: alcune aree mantengono tracciati medievali tortuosi, altre esibiscono regolarizzazioni. Predominanza di costruzioni in mattone. Emergenza di nuove tipologie edilizie (terraced houses).

Scenario controfattuale 1: "Se l'incendio non fosse accaduto". Possiamo simulare l'evoluzione della City senza l'incendio utilizzando modelli di crescita urbana calibrati su periodi pre-1666 ed estrapolati. Predizioni:

- Persistenza di densità edilizia medievale estremamente elevata con prevalenza di strutture in legno
- Preservazione della morfologia stradale medievale complessa
- Minore regolamentazione costruttiva; mancanza di standardizzazione tipologica
- Maggiore vulnerabilità a incendi successivi data la densità e combustibilità
- Possibile evoluzione più graduale senza discontinuità traumatica

Scenario controfattuale 2: "Se la ricostruzione fosse stata completamente pianificata secondo il Piano di Wren". Christopher Wren propose un piano radicale con griglia ortogonale, piazze monumentali, viali radianti. Il piano fu rifiutato per complessità legale (ridefinizione proprietà), costi, urgenza. Predizioni:

- Morfologia regolare simile a città barocche pianificate (Torino, Versailles)
- Maggiore accessibilità veicolare; minore densità di intersezioni
- Possibile perdita di identità storica; omogeneizzazione spaziale
- Diversa distribuzione di valori immobiliari; centralità ridistribuite

La calibrazione di modelli controfattuali richiede:

1. **Modello di base:** Un modello computazionale (ABM, modello di diffusione, network model) calibrato sulla storia osservata pre-intervento
2. **Intervento controfattuale:** Modifica di parametri, condizioni iniziali, o regole corrispondente allo scenario ipotetico
3. **Simulazione:** Esecuzione del modello modificato per generare traiettorie alternative
4. **Analisi comparativa:** Confronto tra outcomes osservati e controfattuali mediante metriche quantitative

Implementazione Computazionale

Software di simulazione multi-agente permette implementazioni esplicite. Esempio pseudo-code per simulazione post-incendio Londra:

```
# Stato iniziale: City di Londra pre-1666
city_state_1665 = initialize_medieval_london()

# Scenario osservato: incendio + ricostruzione parzialmente pianificata
city_state_1666_burned = apply_fire_destruction(city_state_1665, extent=0.80)
city_state_1700_observed = simulate_reconstruction(
    city_state_1666_burned,
    regulations={'material':'brick', 'street_width_min':10},
    planning='partial',
    years=34
)

# Scenario controfattuale 1: no incendio
city_state_1700_no_fire = simulate_organic_growth(
    city_state_1665,
    years=35,
    regulations={'material':'wood'} # mancanza regolamentazione
)

# Scenario controfattuale 2: piano Wren completo
city_state_1666_burned = apply_fire_destruction(city_state_1665, extent=0.80)
city_state_1700_wren = simulate_reconstruction(
    city_state_1666_burned,
    planning='wren_plan',
    grid_type='orthogonal',
    years=34
)

# Comparazione metriche
metrics = {
    'street_network_fractal_dimension': [],
    'building_density': [],
    'material_composition': []
}

for scenario in [city_state_1700_observed, city_state_1700_no_fire, city_state_1700_wren]:
    metrics['street_network_fractal_dimension'].append(calculate_fractal_D(scenario))
    metrics['building_density'].append(calculate_density(scenario))
    metrics['material_composition'].append(analyze_materials(scenario))
```

Incertezza e Branching Multiplo

Scenari controfattuali sono intrinsecamente incerti. Anche specificando un evento diverso (es. nessun incendio), molteplici traiettorie successive sono possibili date le stocasticità nei

processi sociali ed economici. L'approccio rigoroso genera ensembles di traiettorie controfattuali mediante simulazioni Monte Carlo ripetute con variazioni stocastiche.

La **distanza tra storie** può essere quantificata. Date due configurazioni urbane C_1 e C_2 , si definiscono metriche di dissimilarità:

- **Distanza morfologica:** Dissimilarità nella struttura della rete stradale (edit distance su grafi, confronto distribuzione orientazioni, metriche topologiche)
- **Distanza compositiva:** Divergenza KL tra distribuzioni di materiali, tipologie edilizie, densità
- **Distanza funzionale:** Differenze in distribuzione usi del suolo, accessibilità, flussi

La distribuzione di distanze tra scenario osservato e ensemble controfattuale quantifica quanto l'evento contingente ha influenzato l'evoluzione: distanze grandi indicano impatto trasformativo; distanze piccole suggeriscono convergenza verso attrattori robusti.

Applicazioni Controfattuali Aggiuntive

Terremoti: Città sismiche (Lisbona 1755, San Francisco 1906, L'Aquila 2009) hanno subito ricostruzioni che ridefinirono morfologie. Controfattuali "senza terremoto" vs "con ricostruzione alternativa" informano pianificazione resiliente.

Epidemie: La Peste Nera (1347-1353) decimò popolazioni urbane europee, causando abbandoni, contrazioni urbane, riorganizzazioni spaziali. Simulazioni controfattuali senza epidemia esplorerebbero traiettorie di crescita sostenuta.

Decisioni infrastrutturali: Costruzione di ferrovie, autostrade, ponti genera biforcazioni. Scenari con/senza specifica infrastruttura valutano impatti su sviluppo urbano, distribuzione valori immobiliari, segregazione.

Innovazioni tecnologiche: Introduzione di materiali (cemento armato, acciaio strutturale), tecnologie (ascensori abilitando grattacieli), regolamentazioni (zoning codes) costituiscono punti di biforcazione. Controfattuali "senza innovazione X" quantificano il loro ruolo trasformativo.

Limitazioni e Caveats

L'analisi controfattuale affronta sfide metodologiche:

Validazione: Scenari controfattuali sono per definizione non osservati; validazione empirica diretta è impossibile. Validazione indiretta confronta predizioni su periodi osservati (backtesting).

Assunzioni: Modelli incorporano assunzioni su meccanismi causali, parametri, stocasticità. Controfattuali sono sensibili a queste assunzioni; analisi di sensibilità è essenziale.

Complessità: Sistemi urbani sono enormemente complessi con feedback multipli, non-linearità, emergenze. Modelli semplificati catturano solo frazioni della complessità reale.

Interpretazione: Risultati controfattuali informano comprensione ma non determinano "cosa sarebbe realmente accaduto". Umiltà epistemica è appropriata.

Nonostante limitazioni, controfattuali forniscono insights unici su causalità, path-dependency, robustezza/fragilità delle traiettorie urbane, e sulle conseguenze di decisioni umane e eventi naturali.

Sintesi Metodologica e Prospettive Future

La stratigrafia urbana e l'archeologia della stratificazione edilizia costituiscono un campo interdisciplinare maturo che integra metodologie derivate da archeologia, architettura, geologia, matematica applicata, scienze della complessità, e statistica. Questo trattato ha esplorato il vasto arsenale di tecniche disponibili per decifrare gli archivi pietrificati delle città:

Fondamenti stratigrafici: La legge di sovrapposizione, la Harris Matrix come DAG, gli ordinamenti parziali (poset) forniscono il framework concettuale per organizzare informazioni stratigrafiche in sequenze cronologiche relative rigorose.

Datazione integrata: L'integrazione bayesiana di datazioni radiometriche (radiocarbonio, dendrocronologia, termoluminescenza) con vincoli stratigrafici produce cronologie assolute robuste con quantificazione rigorosa dell'incertezza.

Caratterizzazione materiali: Tecniche archeometriche (XRF, petrografia, analisi isotopiche) identificano provenienze, tecnologie produttive, reti commerciali, tracciando movimenti di materiali attraverso spazio e tempo.

Analisi spaziale: Indici di autocorrelazione spaziale (Moran's I, LISA), variogrammi geostatistici, analisi frattale rivelano pattern di distribuzione spaziale delle caratteristiche architettoniche, identificando clustering, dispersione, scale di correlazione.

Network analysis: Concettualizzare edifici come nodi e relazioni (condivisione materiali, maestranze, stili) come archi permette applicazione di teoria dei grafi: metriche di centralità, rilevamento comunità, analisi di motifs, robustezza, grafi di spolia.

Topologia algebrica: Omologia persistente identifica features topologiche (componenti connesse, cicli, cavità) che persistono attraverso filtrazioni temporali o spaziali, distinguendo caratteristiche robuste da rumore transitorio.

Modellazione spazio-temporale: GIS quadridimensionali, modelli di superfici come funzioni $h(x,y,t)$, equazioni di diffusione, simplicial complexes temporali rappresentano evoluzione volumetrica della stratificazione urbana.

Morfogenesi computazionale: Agent-based models, automi cellulari, modelli di crescita preferenziale simulano processi bottom-up che generano pattern morfologici complessi da regole locali semplici, esplorando meccanismi di auto-organizzazione.

Analisi controfattuale: Simulazioni di storie ramificate esplorano scenari alternativi, quantificano path-dependency, valutano robustezza di traiettorie, informano comprensione causale.

Direzioni Future

L'evoluzione del campo sarà guidata da progressi tecnologici e concettuali:

Acquisizione dati massiva: Laser scanning aereo (LiDAR), fotogrammetria da droni, tomografie sismiche urbane, georadar multi-array genereranno dataset volumetrici ad altissima risoluzione coprendo intere città. Sfide computazionali nella gestione, processamento, visualizzazione di petabyte di dati 3D.

Machine learning e AI: Algoritmi di deep learning per segmentazione automatica di unità stratigrafiche in nuvole di punti, classificazione automatica di elementi architettonici, riconoscimento pattern tipologici, predizione di sequenze stratigrafiche da dati parziali.

Integrazione multi-scala: Unificazione di modelli molecolari (processi di degrado a scala nanometrica), strutturali (comportamento meccanico elementi), edilizi (singoli edifici), urbani (quartieri), regionali (sistemi di città) in framework multi-scala coerenti.

Digital twins urbani: Gemelli digitali di città storiche che integrano modelli 3D ad alta fedeltà con dati multi-temporali, sensori in tempo reale, simulazioni predittive, abilitando monitoraggio dinamico, conservazione preventiva, pianificazione informata.

Crowdsourcing e citizen science: Coinvolgimento pubblico nella documentazione mediante applicazioni mobili per fotografia geotaggata, identificazione collaborativa di elementi architettonici, validazione distribuita di ricostruzioni.

Open data e interoperabilità: Standardizzazione di formati dati (CityGML, IFC per heritage), repository aperti, piattaforme collaborative per condivisione dati stratigrafici globali, facilitando meta-analisi comparative trans-culturali.

Sostenibilità e resilienza: Applicazione di stratigrafia urbana per informare retrofit energetici, adattamenti climatici, conservazione sostenibile, valorizzando la conoscenza stratificata nel patrimonio costruito esistente.

Riflessione Conclusiva

Le città sono documenti straordinariamente ricchi della storia umana, archivi involontari che preservano memorie di millenni di aspirazioni, conflitti, innovazioni, adattamenti. La stratigrafia urbana fornisce le lenti metodologiche per leggere questi documenti pietrificati, trasformando pietre mute in narrazioni eloquenti.

Ogni muro porta iscritto, nella sua tessitura materiale, nelle sue interfacce stratigrafiche, nei suoi materiali riutilizzati, frammenti di storie: storie di maestranze che lo eressero, di cave

che fornirono la pietra, di tecnologie disponibili nell'epoca, di gusti estetici prevalenti, di eventi traumatici che lo danneggiarono, di restauri che lo preservarono.

L'integrazione rigorosa di evidenze archeologiche, analisi archeometriche, modellazione matematica, simulazione computazionale trasforma l'archeologia della stratificazione edilizia da disciplina prevalentemente qualitativa a scienza quantitativa robusta, capace di testare ipotesi, quantificare incertezze, predire outcomes, esplorare controfattuali.

In un'epoca di rapide trasformazioni urbane, la comprensione profonda dei processi che hanno generato le morfologie storiche è cruciale non solo per conservazione e valorizzazione del patrimonio, ma anche per informare progettazione urbana sostenibile che rispetti sedimentazioni stratificate di significati, memorie, identità.

Gli archivi pietrificati aspettano pazientemente di essere letti. Le metodologie esplorate in questo trattato forniscono le chiavi per decifrare i loro testi complessi, rivelando le narrazioni stratificate scritte nella pietra, nel mattone, nella malta - narrazioni che collegano passati remoti a presenti abitati a futuri possibili.

Tecniche Avanzate di Analisi Stratigrafica e Archeologia Quantitativa

Seriation e Ordinamento Cronologico di Assemblaggi Artefattuali

La seriazione costituisce una famiglia di tecniche per ordinare cronologicamente assemblaggi archeologici basandosi sull'assunto che stili e tipologie artefattuali evolvono gradualmente nel tempo. Sviluppata originariamente da Flinders Petrie alla fine del XIX secolo e matematicamente formalizzata nel XX secolo, la seriazione fornisce ordinamenti cronologici relativi anche in assenza di datazioni assolute o relazioni stratigrafiche dirette.

Il principio fondamentale è che la popolarità di una tipologia specifica segue una curva unimodale nel tempo: la tipologia appare raramente (fase di introduzione), aumenta gradualmente di frequenza (fase di adozione), raggiunge un picco di popolarità, e successivamente declina fino a scomparire (fase di abbandono). Questo pattern, noto come battleship curve per la sua forma caratteristica, riflette processi di diffusione culturale, cicli di moda, obsolescenza tecnologica.

Formalmente, si considera un insieme di n assemblaggi $A_1, A_2, \dots, A_n$ (che possono essere strati archeologici, edifici, contesti funerari) e m tipologie $T_1, T_2, \dots, T_m$ (ceramiche, monete, elementi architettonici). Per ciascun assemblaggio A_i e tipologia T_j , si definisce la frequenza relativa $f_{ij} = (\text{numero di oggetti di tipo } T_j \text{ nell'assemblaggio } A_i) / (\text{totale oggetti nell'assemblaggio } A_i)$.

La matrice di frequenze $F = [f_{ij}]$ è una matrice $n \times m$. L'obiettivo della seriazione è permutare le righe (riordinare gli assemblaggi) tale che ciascuna colonna (ciascuna tipologia) esibisca un pattern unimodale: frequenze che aumentano, raggiungono un massimo, e successivamente decrescono.

Seriazione Frequency

L'algoritmo classico di frequency seriation procede iterativamente:

1. Inizializzare con un ordinamento arbitrario degli assemblaggi
2. Per ciascuna tipologia, calcolare il centroide temporale: $c_j = \sum_i (i \times f_{ij}) / \sum_i f_{ij}$
3. Ordinare le tipologie per centroidi crescenti
4. Per ciascun assemblaggio, calcolare lo score: $s_i = \sum_j (j \times f_{ij})$
5. Riordinare gli assemblaggi per score crescenti
6. Iterare passi 2-5 fino a convergenza

Il risultato è un ordinamento degli assemblaggi che tende a posizionare assemblaggi cronologicamente vicini in posizioni adiacenti, e un ordinamento delle tipologie che riflette le loro sequenze di popolarità.

Correspondence Analysis

La correspondence analysis (analisi delle corrispondenze) fornisce un approccio multivariato più sofisticato. Questa tecnica decompone la matrice di frequenze F mediante decomposizione ai valori singolari (SVD) della matrice di residui standardizzati, proiettando sia assemblaggi che tipologie in uno spazio di dimensionalità ridotta (tipicamente 2D) dove prossimità geometrica riflette associazioni.

La procedura matematica:

1. Calcolare le masse riga $r_i = \sum_j f_{ij}$ e masse colonna $c_j = \sum_i f_{ij}$
2. Calcolare la matrice di residui standardizzati: $R_{ij} = (f_{ij} - r_i \times c_j) / \sqrt{r_i \times c_j}$
3. Applicare SVD: $R = U \Sigma V^T$
4. Le coordinate degli assemblaggi nel k-esimo asse sono $u_{ik} \times \sigma_k / \sqrt{r_i}$
5. Le coordinate delle tipologie sono $v_{jk} \times \sigma_k / \sqrt{c_j}$

Gli assi risultanti catturano i principali pattern di variazione. In contesti archeologici, il primo asse cattura frequentemente variazione temporale: posizioni lungo il primo asse correlano fortemente con cronologia. Assi successivi possono riflettere variazioni regionali, funzionali, o sociali.

La visualizzazione simultanea di assemblaggi e tipologie nello spazio multidimensionale scaling rivela associazioni: assemblaggi vicini condividono composizioni simili; tipologie vicine co-occorrono frequentemente; tipologie lontane raramente coesistono.

Applicazioni alla Stratigrafia Edilizia

Nella building archaeology, la seriazione può ordinare cronologicamente edifici o fasi costruttive basandosi su frequenze di elementi architettonici:

- **Tipologie di mattoni:** Dimensioni, rapporti lunghezza/spessore, composizione argillosa, temperature di cottura evolvono diacronicamente
- **Tecniche di legatura muraria:** Opus quadratum, opus mixtum, opus spicatum, apparecchi a corsi alternati seguono successioni cronologiche regionali
- **Elementi decorativi:** Modanature, capitelli, mensole, cornici esibiscono evoluzione stilistica

- **Materiali di copertura:** Tegole di forme diverse, dimensioni variabili, caratterizzano epoche specifiche

Costruendo matrici di frequenze per questi attributi attraverso collezioni di edifici datati, e applicando seriazione/correspondence analysis, si generano sequenze cronologiche di riferimento. Edifici di età ignota possono essere posizionati in queste sequenze confrontando le loro composizioni artefattuali.

Stratigrafie Negative: Archeologia delle Assenze e delle Distruzioni

Non solo ciò che è preservato, ma anche ciò che è assente fornisce informazione archeologica critica. Le stratigrafie negative - evidenze di rimozioni, distruzioni, assenze - costituiscono un palinsesto complementare che documenta processi di de-costruzione, abbandono, trasformazione.

Interfacce di Taglio e Superfici di Distruzione

Edward Harris ha enfatizzato l'importanza di registrare non solo unità stratigrafiche positive (depositi, murature) ma anche interfacce negative:

Interfacce di taglio: Superfici che delimitano asportazioni di materiale. Una fossa scavata attraverso strati preesistenti crea un'interfaccia di taglio tridimensionale. L'interfaccia è più recente di tutte le unità che essa taglia, e più antica del riempimento che eventualmente la colma.

Superfici di demolizione: Quando un edificio viene demolito, la superficie risultante rappresenta un evento di distruzione databile. Frammenti di muratura residui, macerie in situ, tracce di asportazione forniscono evidenze della demolizione.

Superfici di erosione: Processi naturali (erosione fluviale, weathering atmosferico) o antropici (livellamenti intenzionali) creano superfici di troncamento che eliminano porzioni della sequenza stratigrafica.

La documentazione sistematica delle interfacce negative richiede identificazione accurata dei loro limiti spaziali, descrizione delle loro caratteristiche fisiche (orientazione, inclinazione, rugosità, profilo), e registrazione delle relazioni stratigrafiche: quali unità sono tagliate, quale unità costituisce il riempimento.

Analisi dei Vuoti Urbani

Le lacune nel tessuto edilizio - lotti non costruiti, giardini, cortili, spazi aperti - non sono necessariamente primordiali ma spesso risultano da demolizioni, abbandoni, pianificazioni intenzionali. L'archeologia dei vuoti urbani interroga le storie di queste assenze.

Tecniche includono:

Analisi planimetrica diacronica: Confronto di mappe storiche successive identifica lotti precedentemente edificati e successivamente svuotati. La sequenza: edificato → vuoto documenta un processo di contrazione urbana, demolizione programmata, o distruzione traumatica.

Scavo archeologico di lotti vuoti: Anche siti apparentemente vuoti preservano stratificazioni sepolte che documentano occupazioni precedenti. Fondazioni residue, livelli pavimentali, depositi di macerie rivelano edifici scomparsi.

Analisi geofisica: Georadar, resistività elettrica, magnetometria identificano anomalie sepolte senza scavo, mappando fondazioni di strutture demolite.

Analisi documentaria: Catasti, contratti di demolizione, permessi edilizi documentano eventi di rimozione.

La distribuzione spaziale dei vuoti può riflettere pattern sistematici: demolizioni concentrate lungo tracciati stradali pianificati, abbandoni in quartieri economicamente deprimés, distruzioni belliche lungo traiettorie di bombardamento.

Quantificazione della Distruzione

La frazione del patrimonio edilizio storico che è stata distrutta può essere stimata confrontando censimenti edilizi storici con inventari contemporanei. Se documenti storici registrano N edifici nel XVII secolo in un quartiere, e solo n edifici del XVII secolo sopravvivono oggi, il tasso di sopravvivenza è $R = n/N$ e il tasso di distruzione è $D = 1 - R$.

Modelli di sopravvivenza analizzano fattori che influenzano probabilità di preservazione:

- **Qualità costruttiva:** Edifici in materiali duraturi (pietra) sopravvivono meglio di edifici in materiali deperibili (legno, terra)
- **Funzione:** Edifici monumentali, religiosi, pubblici ricevono maggiore manutenzione rispetto a edilizia residenziale ordinaria
- **Posizione:** Edifici in centri storici preservati hanno tassi di sopravvivenza elevati; edifici in zone soggette a sviluppo intensivo hanno tassi bassi
- **Eventi traumatici:** Guerre, terremoti, incendi causano distruzioni massive episodiche

Modelli di hazard proporzionali (Cox models) formalizzano queste relazioni:

$$h(t | X) = h_0(t) \times \exp(\beta_1 \times X_1 + \beta_2 \times X_2 + \dots + \beta_p \times X_p)$$

dove $h(t | X)$ è il tasso istantaneo di distruzione al tempo t per un edificio con caratteristiche $X = (X_1, \dots, X_p)$, $h_0(t)$ è il baseline hazard, e $\beta = (\beta_1, \dots, \beta_p)$ sono coefficienti da stimare. L'analisi di dataset storici stima questi coefficienti, quantificando l'importanza relativa di diversi fattori di rischio.

Ricostruzioni Virtuali e Uncertainty Visualization

Le ricostruzioni tridimensionali di edifici storici e configurazioni urbane passate costituiscono strumenti potenti per comunicazione, didattica, ricerca. Tuttavia, le ricostruzioni sono intrinsecamente incerte: evidenze archeologiche e documentarie sono frammentarie, interpretazioni sono multiple, alternative sono plausibili.

La visualizzazione rigorosa dell'incertezza nelle ricostruzioni virtuali richiede tecniche che comunichino non solo una singola configurazione "migliore stima" ma l'intero spazio delle possibilità compatibili con le evidenze.

Livelli di Evidenza e Trasparenza

Un approccio stratificato assegna elementi ricostruiti a categorie basate sulla robustezza delle evidenze:

Livello 1 - Evidenze dirette preservate: Elementi fisicamente esistenti, documentati mediante rilievo accurato. Visualizzati con massima opacità e dettaglio.

Livello 2 - Evidenze archeologiche: Elementi non preservati in elevato ma documentati da fondazioni, impronte, scavi. Visualizzati con opacità ridotta o colori distintivi.

Livello 3 - Evidenze documentarie: Elementi descritti in testi, raffigurati in iconografia storica (dipinti, incisioni, fotografie). Visualizzati con maggiore trasparenza.

Livello 4 - Analogie tipologiche: Elementi ricostruiti basandosi su comparazioni con edifici coevi simili. Visualizzati con massima trasparenza o mediante wireframe.

Livello 5 - Speculazioni: Elementi privi di evidenze dirette, inseriti per completezza compositiva. Visualizzati con overlay espliciti che segnalano natura ipotetica.

Questa stratificazione permette agli utenti di distinguere visivamente cosa è certo da cosa è inferito, facilitando valutazioni critiche.

Visualizzazioni Probabilistiche

Approcci più sofisticati generano ensembles di ricostruzioni alternative campionando distribuzioni di probabilità sui parametri incerti. Per esempio, se l'altezza di un edificio demolito è incerta ma vincolata tra 8 m e 14 m, si campionano multipli valori da questa distribuzione, generando ricostruzioni diverse.

Tecniche di visualizzazione includono:

Animazioni di variazione parametrica: L'utente osserva transizioni fluide tra configurazioni alternative, sviluppando intuizione sulla sensibilità della ricostruzione a parametri specifici.

Heatmaps di probabilità: Voxel spaziali sono colorati secondo la probabilità che quel volume fosse occupato da materiale costruttivo. Regioni ad alta probabilità (consenso tra ricostruzioni alternative) sono opache; regioni a bassa probabilità sono trasparenti.

Confidence intervals tridimensionali: Superfici esterne rappresentano limiti estremi compatibili con evidenze; superfici interne rappresentano configurazioni di massima probabilità.

Interactive exploration: Interfacce permettono agli utenti di modificare assunzioni (ipotesi A vs ipotesi B sulla copertura) e osservare impatti in tempo reale, trasformando la ricostruzione in uno strumento di testing di ipotesi.

Realtà Virtuale e Aumentata per Stratigrafia

Tecnologie immersive offrono potenzialità uniche:

VR per sequenze stratigrafiche multi-temporali: Utenti navigano virtualmente attraverso configurazioni successive di un edificio, "viaggiando nel tempo" per osservare trasformazioni diacroniche. Interfacce permettono di "pelare" strati successivi, rivelando fasi precedenti.

AR per sovrapposizioni in situ: Dispositivi mobili (smartphone, tablet, AR glasses) sovrappongono ricostruzioni virtuali alla realtà fisica osservata. Visitando un sito archeologico, utenti visualizzano ricostruzioni delle strutture originarie sovrapposte alle rovine presenti, facilitando comprensione.

Collaborative virtual archaeology: Piattaforme multi-utente permettono a studiosi distribuiti geograficamente di incontrarsi in spazi virtuali condivisi, discutere interpretazioni, annotare modelli 3D, costruire consenso collaborativo.

Archeologia Forense Urbana: Stratificazione e Crimine

Principi stratigrafici trovano applicazioni inaspettate nell'archeologia forense e nelle investigazioni criminali in contesti urbani. La stratigrafia di depositi associati a scene di crimine, la datazione relativa di eventi, la ricostruzione di sequenze temporali costituiscono componenti critici delle investigazioni.

Stratigrafia di Scene di Crimine

Quando corpi o evidenze sono sepolti o nascosti in contesti urbani (cantieri, giardini, edifici abbandonati), la stratigrafia dei depositi fornisce vincoli cronologici. La legge di sovrapposizione si applica rigorosamente: materiali sopra un corpo sono stati depositati dopo l'interramento; materiali sotto sono pre-esistenti.

L'analisi stratigrafica forense documenta:

- **Sequenza di deposizione:** Ordine degli strati, identificazione di disturbi post-deposizionali
- **Interfacce di taglio:** Se il corpo è in una fossa scavata, l'interfaccia di taglio fornisce il terminus post quem per l'interramento
- **Datazione relativa di artefatti:** Oggetti stratificati con il corpo (giornali, monete, contenitori con date di produzione) forniscono termini ante/post quem

Tecniche archeometriche sono applicabili:

- **Entomologia forense:** Insetti che colonizzano resti seguono successioni ecologiche prevedibili; identificazione degli stadi permette stima del post-mortem interval
- **Palinologia forense:** Pollini presenti nel terreno riflettono vegetazione stagionale; assemblaggio palinologico indica stagione di deposizione
- **Geochimica:** Composizioni di suoli possono discriminare provenienze; se suolo nella fossa differisce dal suolo circostante, indica trasporto

Datazione di Strutture Clandestine

Tunnel, bunker, nascondigli costruiti illegalmente possono essere datati mediante principi stratigrafici e tecniche archeometriche:

- **Tecnologie costruttive:** Materiali (cemento, laterizi) esibiscono evoluzioni diacroniche; formulazioni di cementi cambiano storicamente
- **Artefatti incorporati:** Oggetti persi durante costruzione (monete, sigarette, contenitori) forniscono termini post quem
- **Dendrocronologia:** Legni strutturali datano anno di abbattimento
- **Radiocarbonio:** Malte contenenti carbonio organico (calce aerea prodotta da combustione biomassa) possono essere datate, sebbene con cautele metodologiche

Ricostruzione di Sequenze Criminali

La stratigrafia di depositi multi-layer in edifici (ad esempio, successivi strati di vernice, carta da parati, pavimentazioni) può ricostruire cronologie di occupazioni e trasformazioni rilevanti per investigazioni:

- **Sequenze di riverniciature:** Analisi di campioni microscopici di vernice rivelano successioni di colori; confronto con mode cronologicamente caratterizzate fornisce datazioni
- **Modifiche strutturali:** Tamponamenti di aperture, rimozione di partizioni interne seguono sequenze stratigrafiche leggibili
- **Depositi chimici:** Residui di attività illegali (produzione stupefacenti, stoccaggio materiali pericolosi) possono stratificarsi; analisi chimica degli strati permette ricostruzione temporale

L'applicazione forense richiede rigore metodologico assoluto: catena di custodia delle evidenze, documentazione fotografica e grafica dettagliata, campionamento secondo protocolli standardizzati, analisi in laboratori accreditati.

Stratificazione Immateriale, Memorie Incorporate e Dimensioni Sociali

Stratificazione di Pratiche Costruttive: Saperi Artigianali come Strati Temporal

Oltre alla stratificazione fisica dei materiali, le città preservano stratificazioni immateriali di conoscenze tecniche, pratiche artigianali, tradizioni costruttive. Questi saperi taciti, trasmessi attraverso apprendistati e comunità professionali, evolvono diacronicamente lasciando tracce leggibili nelle murature.

Chaîne Opératoire: Sequenze Operative nella Costruzione

Il concetto di chaîne opératoire, sviluppato in archeologia preistorica per analizzare processi di fabbricazione litica, si applica fruttuosamente alla costruzione edilizia. Una chaîne opératoire è la sequenza completa di operazioni tecniche che trasformano materie prime in prodotto finito.

Per una muratura in laterizi, la chaîne opératoire include:

1. **Estrazione argilla:** Selezione depositi, scavo
2. **Preparazione impasto:** Depurazione, aggiunta degrassanti, idratazione
3. **Foggiatura:** Modellatura manuale, stampo, tornitura
4. **Essiccazione:** Tempo, condizioni ambientali
5. **Cottura:** Temperatura, atmosfera (ossidante/riducente), durata
6. **Trasporto:** Dal sito di produzione al cantiere
7. **Posa in opera:** Selezione mattoni, preparazione malta, tecnica di legatura
8. **Finiture:** Stuccatura giunti, intonaco

Ogni fase incorpora decisioni tecnologiche che riflettono conoscenze disponibili, risorse accessibili, preferenze estetiche, vincoli economici. Variazioni diacroniche in queste decisioni costituiscono una stratificazione di pratiche.

L'analisi comparativa di chaînes opératoires attraverso periodi e regioni identifica:

Continuità tecnologiche: Pratiche che si mantengono stabili attraverso generazioni, indicando tradizioni consolidate, trasmissioni fedeli di conoscenze

Innovazioni: Introduzioni di nuove tecniche (nuovi degrassanti, variazioni temperature di cottura, legature murarie inedite), identificabili come discontinuità nelle chaînes opératoires

Regressioni: Perdite di competenze, semplificazioni tecnologiche durante periodi di crisi, declino demografico, interruzioni trasmissione saperi

Analisi Statistica di Variabilità Artigianale

Le produzioni artigianali esibiscono variabilità intrinseca: nessun mattone è identico, ogni muratore ha la sua "mano". Questa variabilità può essere caratterizzata statisticamente e utilizzata per identificare maestranze, periodi, tradizioni.

Per mattoni, si misurano attributi metrici multipli: lunghezza L , larghezza W , spessore H . Per ciascun lotto di n mattoni, si calcolano statistiche descrittive:

- Medie: $\bar{L}$, $\bar{W}$, $\bar{H}$
- Deviazioni standard: σ_L , σ_W , σ_H
- Coefficienti di variazione: $CV_L = \sigma_L / \bar{L}$

Lotti prodotti meccanicamente in epoca industriale esibiscono CV bassi ($< 2\%$), riflettendo standardizzazione. Lotti pre-industriali prodotti manualmente hanno CV più elevati (3-8%).

L'analisi multivariata (PCA, cluster analysis) su attributi multipli raggruppa mattoni in classi produttive. Mattoni dello stesso periodo e regione tendono a cluster; discontinuità nei cluster segnalano cambi di produttori o di periodi.

Graffiti e Iscrizioni: Stratigrafia di Comunicazione Visiva

Le superfici architettoniche fungono da substrati per comunicazioni visive stratificate: iscrizioni commemorative, graffiti spontanei, segnaletica, pubblicità dipinta. Questi layer

comunicativi documentano usi sociali degli spazi, pratiche di appropriazione simbolica, evoluzioni linguistiche.

Stratigrafia di Graffiti Sovrapposti

Graffiti multipli sulle stesse superfici formano sequenze stratigrafiche leggibili: incisioni o pitture più recenti coprono o interagiscono con quelle precedenti. La documentazione sistematica richiede:

Fotografia radente: Illuminazione obliqua accentua bassorilievi, rendendo visibili incisioni superficiali

Fotografia multispettrale: Imaging in infrarosso, ultravioletto rivela pigmenti invisibili a occhio nudo, distingue layers sovrapposti

Fotogrammetria ad alta risoluzione: Modelli 3D texturizzati preservano microrilievi, permettono analisi post-acquisizione

Tracciatura stratigrafica: Identificazione di relazioni di sovrapposizione: quale graffito copre quale altro

L'analisi contenutistica dei graffiti fornisce informazioni cronologiche e sociali:

- **Date esplicite:** Graffiti datati forniscono termini ante quem per graffiti sottostanti, post quem per sovrastanti
- **Riferimenti storici:** Menzioni di eventi (guerre, feste, personalità) contestualizzano temporalmente
- **Evoluzioni linguistiche:** Ortografie, lessici, sintassi cambiano diacronicamente; analisi linguistica data graffiti
- **Mani individuali:** Calligrafie distintive identificano autori ricorrenti; distribuzioni spaziali dei graffiti della stessa mano mappano mobilità individuali

Network Sociali dai Graffiti

Graffiti interattivi - risposte a graffiti precedenti, dialoghi incisi - rivelano reti di interazione sociale. Si costruisce un grafo dove nodi rappresentano autori individuali (identificati da firme, calligrafie) e archi rappresentano interazioni:

- Arco diretto da A a B se B risponde esplicitamente a un graffito di A
- Peso dell'arco proporzionale alla frequenza di interazioni

Metriche di centralità identificano individui influenti; struttura comunitaria rivela gruppi sociali coesi. Distribuzione temporale delle interazioni traccia dinamiche sociali: formazione di gruppi, conflitti, alleanze.

Soundscapes Storici: Archeoacustica e Stratificazione Sonora

Le configurazioni architettoniche e urbane determinano proprietà acustiche che influenzano profondamente esperienze sensoriali, comunicazioni, pratiche rituali. L'archeoacustica

ricostruisce paesaggi sonori passati mediante simulazioni fisiche basate su geometrie ricostruite.

Modellazione Acustica di Spazi Storici

La propagazione del suono in ambienti architettonici è governata dall'equazione delle onde:

$$\nabla^2 p - (1/c^2) \times \partial^2 p / \partial t^2 = 0$$

dove $p(x,y,z,t)$ è la pressione acustica, c è la velocità del suono. Le condizioni al contorno dipendono dalle proprietà assorbenti/riflettenti delle superfici.

Software di ray-tracing acustico (CATT, ODEON) simulano propagazione in geometrie 3D complesse. Processo:

1. **Modello geometrico 3D:** Ricostruzione accurata dello spazio architettonico
2. **Assegnazione materiali acustici:** Coefficienti di assorbimento per diverse frequenze per ciascuna superficie (pietra, legno, intonaco, tessuti)
3. **Posizionamento sorgenti/ricevitori:** Sorgente sonora (oratore, musicista) e punti di ascolto
4. **Simulazione:** Tracciamento di raggi sonori, calcolo riflessioni, assorbimenti, diffrazioni
5. **Calcolo parametri acustici:** Tempo di riverberazione T_{60} , definizione D_{50} , chiarezza C_{80} , strength G

Parametri acustici quantificano qualità sonore:

Tempo di riverberazione T_{60} : Tempo necessario affinché energia sonora decada di 60 dB dopo cessazione sorgente. Cattedrali gotiche hanno $T_{60} = 4-8$ s; ambienti residenziali $T_{60} = 0,3-0,6$ s.

Definizione D_{50} : Percentuale energia che arriva nei primi 50 ms rispetto a totale. D_{50} elevato favorisce intelligibilità parlato.

Chiarezza C_{80} : Rapporto logaritmico tra energia precoce (< 80 ms) e tardiva. Valori elevati favoriscono chiarezza musicale.

Ricostruzioni di Pratiche Sonore

Simulazioni acustiche informano comprensioni di pratiche rituali, performative, comunicative:

Liturgie medievali: Canti gregoriani nelle navate gotiche. Simulazioni rivelano come riverberi prolungati favorivano sovrapposizioni armoniche, creando effetti di continuum sonoro mistico.

Oratori barocchi: Teatri anatomici, aule universitarie progettate per ottimizzare proiezione voce del docente verso audience. Analisi acustiche valutano efficacia.

Chiamate pubbliche: Banditori in piazze urbane. Simulazioni identificano posizioni ottimali per massimizzare copertura acustica, considerando riflessioni da facciate circostanti.

Campane: Suoni di campane propagano attraverso tessuti urbani. Simulazioni outdoor mappano aree di udibilità, identificando comunità acustiche definite da raggi d'ascolto.

Virtual Acoustic Reconstruction

Tecniche di auralizzazione sintetizzano esperienze sonore immersive. Registrazioni musicali o vocali vengono convolute con risposte impulsive (impulse responses) simulate degli spazi storici, producendo versioni "come sarebbero state ascoltate" in quei contesti.

Utenti con cuffie binaurali sperimentano soundscapes ricostruiti navigando virtualmente attraverso spazi 3D: spostandosi, l'acustica si modifica dinamicamente, riproducendo variazioni spaziali delle proprietà sonore.

Stratificazione di Significati: Semantica Architettonica Diacronica

Gli edifici non sono mere strutture fisiche ma portatori di significati culturali, simbolici, identitari che evolvono e si stratificano temporalmente. Un edificio costruito come palazzo nobiliare può essere convertito in ospedale, successivamente in scuola, poi in museo: ciascuna trasformazione funzionale sovrappone nuovi strati semantici.

Palinsesti Funzionali

La sequenza diacronica di funzioni può essere ricostruita mediante:

Fonti documentarie: Catasti, contratti di vendita, guide urbane registrano usi **Tracce architettoniche:** Modifiche strutturali riflettono adattamenti funzionali (apertura di molte piccole finestre → conversione residenziale; grandi aperture ad arco → conversione commerciale) **Distribuzione spaziale:** Configurazioni planimetriche caratterizzano funzioni (celle monastiche, uffici burocratici, appartamenti residenziali)

La rappresentazione grafica mediante diagrammi temporali (time-space cubes estesi a dimensioni funzionali) visualizza evoluzioni: asse orizzontale = tempo, asse verticale = tipologie funzionali, segmenti colorati indicano durate di specifici usi.

Appropriazioni Simboliche Successive

Edifici vengono caricati di significati simbolici che cambiano con regimi politici, movimenti religiosi, trasformazioni sociali:

Conversioni religiose: Templi pagani → chiese cristiane → moschee → musei. Ciascuna conversione addiziona/cancella simbolismi (rimozione statue pagane, aggiunta croci, minareti, secolarizzazione).

Memorializzazione politica: Edifici associati a regimi caduti vengono ricontestualizzati: palazzi fascisti reinterpretati, monumenti sovietici rimossi o conservati con nuove narrazioni critiche.

Gentrification semantica: Quartieri popolari acquisiscono connotazioni di creatività, autenticità, bohème, attraendo nuove popolazioni; edifici industriali dismessi diventano loft di prestigio.

L'analisi di questi palinsesti semantici utilizza:

Analisi del discorso: Come edifici sono descritti/rappresentati in media, guide, letteratura attraverso epoche **Etnografia:** Come residenti/utenti contemporanei interpretano, usano, narrano edifici **Iconografia:** Come edifici sono raffigurati visivamente; cambi in rappresentazioni riflettono cambi di significati

Stratificazione di Popolazioni: Bioarcheologia Urbana

Le sequenze di sepolture urbane - cimiteri stratificati, ossari multi-generazionali - documentano popolazioni diacroniche. L'analisi bioarcheologica di resti scheletrici integra stratigrafia archeologica con antropologia fisica, genetica, chimica isotopica.

Stratigrafia Cimiteriale

Cimiteri urbani utilizzati per secoli accumulano sepolture stratigraficamente sovrapposte. Principi stratigrafici si applicano:

- Sepolture inferiori sono anteriori a superiori (salvo disturbi)
- Tagli di fosse successive interrompono sepolture preesistenti
- Sovrapposizioni/intersezioni determinano ordinamenti relativi

La documentazione sistematica registra:

- **Posizione stratigrafica:** Quota assoluta, relazioni con altre sepolture
- **Orientazione:** Direzione testa-piedi (spesso ha significati religiosi/culturali)
- **Trattamento del corpo:** Inumazione primaria, sepoltura secondaria, cremazione
- **Corredi:** Oggetti depositi (gioielli, monete, ceramiche) forniscono datazioni

Analisi Paleodemografica

Assemblaggi scheletrici permettono ricostruzioni demografiche:

Distribuzioni di età: Proporzioni di infanti, giovani, adulti, anziani riflettono mortalità. Popolazioni pre-moderne esibiscono alta mortalità infantile (> 30% < 5 anni).

Sex ratio: Rapporti maschi/femmine; deviazioni da 1:1 possono riflettere sepolture selettive (cimiteri militari, monastici).

Stature: Altezze medie stimabili da ossa lunghe; variazioni diacroniche riflettono nutrizione, salute.

Patologie: Frequenze di malattie (carie dentali, traumi, infezioni, carenze nutrizionali) indicano condizioni di vita.

Tabelle di mortalità (life tables) sintetizzano dati: probabilità di morte per età, aspettativa di vita residua. Confronti diacronici rivelano tendenze: miglioramenti/peggioramenti salute pubblica, impatti di epidemie.

Isotopi e Mobilità

Analisi di isotopi stabili in ossa e denti ricostruiscono diete e mobilità:

Isotopi di carbonio ($\delta^{13}\text{C}$) e azoto ($\delta^{15}\text{N}$): Discriminano diete marine vs terrestri, proteine animali vs vegetali. Popolazioni costiere hanno $\delta^{15}\text{N}$ elevato (consumo pesce); popolazioni agricole interne hanno $\delta^{15}\text{N}$ più basso.

Isotopi di stronzio ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) e ossigeno ($\delta^{18}\text{O}$): Riflettono geologia locale e clima. Individui sepolti localmente ma con ratios non-locali sono migranti. Confrontando ratios in denti (formati nell'infanzia) vs ossa (rimodellate nell'età adulta), si identificano migrazioni.

La mappatura spaziale di individui locali vs non-locali, integrata con stratigrafia, traccia variazioni diacroniche in mobilità: periodi di immigrazione intensa vs periodi di popolazioni residenti stabili.

DNA Antico (aDNA)

Estrazione e sequenziamento di DNA da resti scheletrici rivelano:

Affinità genetiche: Relazioni parentali entro cimiteri; strutture familiari **Ancestry:** Origini biogeografiche; apporti migratori **Patogeni:** DNA di batteri/virus causanti epidemie (Yersinia pestis della peste, Mycobacterium tuberculosis)

Studi di aDNA su sequenze stratigrafiche cimiteriali documentano dinamiche genetiche popolazionali attraverso secoli: continuità vs rimpiazzi, mescolanze, selezioni naturali (resistenze a malattie).

Heritage at Risk: Stratificazione del Degrado

La conservazione del patrimonio edilizio stratificato richiede comprensione dei processi di degrado che agiscono sui materiali, generando essi stessi stratificazioni di alterazione.

Forme di Degrado Stratificate

Croste nere: Depositi carbonatici impregnati di particolato atmosferico (soot, polveri) che si accumulano su superfici lapidee in ambienti urbani inquinati. Le croste crescono progressivamente ($\sim 0,1\text{-}1$ mm/secolo), formando strati databili. Analisi di sezioni sottili rivela laminazioni riflettenti variazioni di inquinamento.

Patine di ossalato: Alcuni licheni biodeteriogeni producono acido ossalico che reagisce con carbonati formando strati di ossalato di calcio. Questi strati proteggono paradossalmente il substrato sottostante da erosione ulteriore.

Sali solubili: Cicli di cristallizzazione/dissoluzione di sali (solfati, cloruri, nitrati) in murature generano pressioni che disgregano materiali. Profili di concentrazione salina attraverso spessori murari riflettono processi di migrazione capillare stratificati temporalmente.

Monitoraggio Multi-Temporale

Il monitoraggio ripetuto delle condizioni conservative genera serie temporali che documentano velocità di degrado:

Fotografia ripetuta: Confronto di immagini dello stesso elemento architettonico a intervalli regolari (decennali, annuali) quantifica perdite materiali, avanzamenti di lesioni.

Laser scanning ripetuto: Differenze tra nuvole di punti successive (point cloud differencing) mappano erosioni, accrescimenti, deformazioni con precisione millimetrica.

Sensori ambientali: Registrazione continua di temperatura, umidità relativa, precipitazioni, concentrazioni inquinanti correla condizioni ambientali con velocità di degrado.

Modelli predittivi di degrado utilizzano serie temporali calibrate per proiettare evoluzioni future, informando pianificazione conservativa: "Al tasso corrente di erosione, lo stemma araldico sarà illeggibile entro 50 anni."

Stratigrafia di Interventi Conservativi

Gli edifici storici hanno subito spesso multipli interventi di restauro, manutenzione, consolidamento che si stratificano:

- **Riprese murarie:** Porzioni ricostruite distinguibili per materiali, tecniche
- **Consolidamenti:** Iniezioni di malte, applicazioni di resine
- **Protezioni superficiali:** Idrorepellenti, biocidi, anti-graffiti stratificati

La documentazione di questi interventi è spesso lacunosa. L'archeologia del restauro ricostruisce storie conservative mediante:

Analisi materiali: Caratterizzazione di malte, consolidanti identifica prodotti commerciali databili
Stilemi di intervento: Filosofie conservative cambiano storicamente (restauro stilistico ottocentesco vs conservazione minima contemporanea)
Fonti archivistiche: Ricerca in archivi di soprintendenze, diari di cantiere

La consapevolezza delle stratificazioni conservative è cruciale: interventi precedenti possono aver alterato proprietà fisiche, introdotto incompatibilità materiali, mascherato evidenze archeologiche.

Casi di Studio e Applicazioni Metodologiche Integrate

Caso di Studio 1: Roma - Palinsesto Tri-Millenario

Roma costituisce forse l'esempio più emblematico di stratificazione urbana complessa multi-millennaria. La città contemporanea si sovrappone a configurazioni barocche, rinascimentali, medievali, paleocristiane, imperiali, repubblicane, arcaiche, generando un palinsesto di densità straordinaria dove singoli edifici incorporano fasi costruttive distribuite su due millenni.

Stratificazione del Pantheon

Il Pantheon offre un micro-cosmo della complessità stratigrafica romana:

Fase 1 (27-25 BCE): Pantheon originario di Agrippa. Orientazione opposta all'attuale, con pronao verso sud. Documentato epigraficamente ma architettonicamente quasi completamente obliterato.

Fase 2 (c. 80 CE, Domiziano): Ricostruzione dopo incendio. Evidenze limitate; probabile mantenimento planimetria originaria.

Fase 3 (118-128 CE, Adriano): Ricostruzione radicale. La rotonda attuale con cupola emisferica, pronao ottastilo corinzio. Tecnologie costruttive innovative: calcestruzzo alleggerito progressivamente verso sommità (aggregati vulcanici densi alla base, pomice leggera alla cupola).

Fase 4 (VII secolo CE): Conversione in chiesa cristiana (Santa Maria ad Martyres, 609 CE). Rimozione statue pagane, alterazione simbolica ma conservazione strutturale.

Fase 5 (Rinascimento-Barocco): Urbano VIII (1623-1644) fa rimuovere rivestimenti bronzei del pronao per fondere cannoni (dove il pasquino "Quod non fecerunt barbari, fecerunt Barberini"). Modifiche interne: altari barocchi, tombe monumentali (Raffaello, Vittorio Emanuele II).

Fase 6 (Restauro moderni): Consolidamenti novecenteschi, impermeabilizzazioni, pulizie.

L'analisi stratigrafica integrata combina:

- **Analisi muraria:** Identificazione interfacce, discontinuità tessiturali, variazioni materiali
- **Archeometria:** Datazione radiocarbonio su malte, caratterizzazione petrologica aggregati
- **Fonti letterarie:** Cassio Dione, Historia Augusta, iscrizioni
- **Rilievo laser scanning:** Documentazione geometria, deformazioni, dissesti

La ricostruzione tridimensionale multi-temporale del Pantheon visualizza configurazioni successive, quantifica volumi costruttivi per fase, identifica materiali reimpiegati.

Network di Spolia nei Fori Imperiali

I Fori Imperiali subirono spoglio sistematico post-antichità. La rete di trasferimenti materiali può essere parzialmente ricostruita:

Nodi (edifici sorgenti): Basilica Ulpia, Tempio di Venere Genitrice, Portici augustei **Nodi (edifici destinazione):** Chiese paleocristiane (San Marco, Santi Cosma e Damiano), palazzi medievali, fornaci da calce

Archi (trasferimenti documentati):

- Colonne corinzie Foro di Traiano → Chiesa di Santa Maria in Trastevere (XII sec)
- Marmi policromi Foro di Augusto → Pavimenti cosmateschi medievali
- Blocchi travertino → Fornaci (produzione calce per cementi medievali)

L'analisi petrografica conferma provenienze: graniti grigi biotitico-muscovitici delle colonne di Santa Maria in Trastevere corrispondono composizionalmente a campioni residui dal Foro di Traiano.

Il grafo degli spolia rivela:

- **Hub principali:** Foro di Traiano (out-degree elevato: materiali distribuiti a 15+ destinazioni)
- **Cluster temporali:** Picchi di attività di spoglio durante VII-VIII sec (declino urbano), XII-XIII sec (rinascita edilizia), XV-XVI sec (renovatio urbis rinascimentale)
- **Distanze di trasferimento:** 80% degli spolia < 2 km (trasporto locale minimizza costi); 20% > 2 km (materiali particolarmente pregiati giustificano sforzi maggiori)

Caso di Studio 2: Venezia - Stratigrafia Idro-Geologica

Venezia presenta sfide stratigrafiche uniche derivanti dalla sua fondazione su isole lagunari con substrati incoerenti. La stratigrafia combina dimensioni geologiche, archeologiche, architettoniche in relazioni complesse mediate dall'acqua.

Fondazioni su Palafitte: Archeologia Subacquea

Gli edifici veneziani poggiano su foreste di pali lignei conficcati attraverso sedimenti lagunari molli fino a raggiungere strati argillosi compatti (caranto) a profondità di 5-10 m. Questi pali, sommersi permanentemente e quindi preservati anaerobicamente, costituiscono archivi dendrocronologici.

Campagne di carotaggio subacqueo hanno estratto pali da fondazioni di:

- **Campanile di San Marco** (crollato 1902, ricostruito 1912): Pali originari X-XII secolo, con sequenze dendrocronologiche che forniscono master chronology veneziana
- **Ca' Foscari** (XV sec): Pali datati 1452-1453, coerenti con documenti di costruzione
- **Ponte di Rialto** (versione lapidea 1588-1591): Pali sottostanti datati 1587-1588

La costruzione della master chronology veneziana per quercia (*Quercus* spp.) copre ora 1000-1700 CE con risoluzione annuale, permettendo datazioni precise di edifici non documentati.

Subsidenza e Stratigrafia Verticale

Venezia subisce subsidenza naturale (compattazione sedimenti) e antropica (estrazione acque sotterranee XX sec, arrestata anni '70). La subsidenza differenziale genera deformazioni variabili spazialmente.

Il monitoraggio mediante:

- **Livellazione di precisione:** Misurazioni ripetute di quote di capisaldi rivelano abbassamenti di 3-5 mm/anno (metà XX sec), ridotti a < 1 mm/anno post-1970
- **InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar):** Satelliti radar misurano spostamenti superficiali con precisione millimetrica, mappando distribuzioni spaziali
- **Modelli geotecnici:** Simulazioni di compattazione multi-strato calibrate su dati storici

La stratigrafia verticale degli edifici veneziani è complicata da rialzamenti pavimentali successivi per compensare subsidenza e acqua alta (acqua alta):

- Pavimenti medievali a quote originarie -0,5 / -1,0 m rispetto a quote attuali
- Successioni di pavimenti sovrapposti (XV, XVII, XIX, XXI sec) documentano rialzamenti episodici
- Tracce di livelli di allagamento storici su murature esterne calibrano eventi estremi

Integrazione GIS Quadridimensionale Idro-Geologico

Un GIS 4D veneziano integra:

- **Stratigrafia geologica:** Modello volumetrico dei sedimenti lagunari (sabbie, limi, argille) con proprietà geotecniche
- **Palificazioni:** Database di 50.000+ pali datati dendrocronologicamente, georeferenziati
- **Edifici storici:** Modelli 3D multitemporali con fasi costruttive
- **Subsidenza:** Serie temporali di deformazioni verticali
- **Acqua alta:** Registrazioni di inondazioni storiche (1600-presente)

Query spaziotemporali complesse sono possibili:

"Identifica edifici costruiti 1400-1500 nelle parrocchie di San Polo e Santa Croce le cui fondazioni raggiungono caranto a profondità > 8 m e che hanno subito subsidenza > 15 cm dal 1950"

Risultati informano prioritizzazione conservativa, progettazione interventi di consolidamento, pianificazione adattamenti al cambiamento climatico (innalzamento livello marino).

Caso di Studio 3: Pompei - Stratigrafia di Catastrofe

L'eruzione del Vesuvio del 79 CE che seppellì Pompei, Ercolano, Stabiae costituisce un evento stratigrafico eccezionale: una sigillatura sincrona di un'intera città congelata in un istante temporale preciso. La stratigrafia vulcanica fornisce sequenze ad altissima risoluzione.

Sequenza Eruttiva Stratigrafica

La successione dei depositi vulcanici a Pompei ricostruisce la dinamica eruttiva:

Fase 1 (pomeriggio 24 ottobre): Colonna pliniana deposita lapilli bianchi (pomici dacitiche) con velocità ~ 15 cm/ora. Accumulo fino a 2,8 m. Coperture crollano sotto peso. Popolazione inizia evacuazione.

Fase 2 (notte 24-25 ottobre): Colonna pliniana deposita lapilli grigi (pomici fonolitiche). Accumulo ulteriore di 1,5 m.

Fase 3-6 (mattina 25 ottobre): Surge piroclastici (sei eventi successivi). Nubi ardenti turbolente ad alta velocità (100-300 km/h) e temperatura (300-400°C) investono la città. Deposit laminati di ceneri fini e blocchi. Mortalità massiva: asfissia, shock termico.

Ogni surge ha caratteristiche distintive (granulometria, composizione, strutture sedimentarie), permettendo identificazione di livelli marker correlabili attraverso scavi.

Calchi di Vuoti: Stratigrafia Negativa Organica

Corpi umani e animali, arredi lignei, vegetali sepolti da ceneri si decomposero lasciando vuoti. L'iniezione di gesso liquido in questi vuoti (tecnica iniziata da Giuseppe Fiorelli, 1863) produce calchi tridimensionali preservanti posizioni di morte, espressioni facciali, dettagli vestimentali.

Oltre 1.000 calchi umani documentano:

- **Distribuzioni spaziali:** Concentrazioni presso porte cittadine (tentativi fuga), in cantine (rifugi), in strade (sorpresi dai surge)
- **Posture:** Molti in posizioni di protezione (mani su volto), altri crollati improvvisamente
- **Demografia:** Rappresentazione di tutte età e sessi; famiglie intere

L'analisi TAC (tomografia assiale computerizzata) di calchi rivela scheletri interni, permettendo:

- **Antropologia fisica:** Età, sesso, stature, patologie
- **Paleopatologia:** Fratture ante-mortem, carie dentali, artropatie
- **Circostanze di morte:** Alcuni calchi mostrano traumi cranici da crolli; altri nessuna ferita esterna (morte per asfissia/shock termico)

Stratigrafia Domestica Micro-Scala

All'interno degli edifici pompeiani, sequenze stratigrafiche micro-scala documentano attività quotidiane:

Casa del Menandro:

- **Livello 1:** Pavimento originario (I sec BCE)
- **Livello 2:** Riparazioni post-terremoto 62 CE: rattoppi murari, rifacimenti intonaci
- **Livello 3:** Accumulo di polvere, detriti domestici pre-eruzione (62-79 CE)
- **Livello 4:** Lapilli bianchi eruttivi (fase 1) filtrati attraverso copertura ancora integra
- **Livello 5:** Crollo copertura sotto peso lapilli
- **Livello 6:** Lapilli grigi (fase 2) depositati su macerie crollo
- **Livello 7:** Surge 3-6 invadono interno, depositano ceneri

Lo scavo stratigrafico micrometrico ha recuperato:

- **Materie organiche carbonizzate:** Cereali, frutta, pane conservati per carbonizzazione
- **Tessuti:** Impronte in ceneri consolidate
- **Rotoli papiracei:** Villa dei Papiri (Ercolano): biblioteca di 1.800+ rotoli

La datazione dendrocronologica di travi carbonizzate conferma 79 CE; l'analisi di anelli di accrescimento in corso negli alberi indica che l'eruzione fu autunnale (ultimi anelli

completamente formati), coerente con la data tradizionale di 24 ottobre (recentemente contestata da un graffito che suggerirebbe ottobre).

Caso di Studio 4: Çatalhöyük - Archeologia della Stratificazione Abitativa

Çatalhöyük (Anatolia centrale, Turchia) è un tell neolitico (7100-5700 BCE) con 18 m di accumulo stratigrafico rappresentanti 1.400 anni di occupazione continua. La peculiarità è l'architettura agglomerata senza strade: abitazioni contigue con accessi attraverso tetti.

Stratigrafia Verticale di Abitazioni Sovrapposte

Le abitazioni neolitiche erano costruite in mattoni crudi (adobe), con vita utile ~ 50-100 anni. Quando un'abitazione degradava, veniva abbandonata, livellata, e una nuova abitazione costruita esattamente sopra. Sequenze verticali documentano 10-15 sovrapposizioni nello stesso lotto.

Ogni abitazione ha stratigrafia interna:

- **Pavimento:** Intonaco calcareo lucidato, rifatto periodicamente (20-100 strati sovrapposti in abitazioni longeve)
- **Focolari:** Posizioni ricorrenti; ceneri stratificate
- **Piattaforme rialzate:** Aree per dormire, spesso sopra sepolture
- **Intonaci murari:** Strati multipli decorati con pitture murali

Sepulture Sub-Floor: Bioarcheologia Stratigrafica

I morti venivano sepolti sotto i pavimenti domestici, generando stratificazioni bioarcheologiche:

- Singole abitazioni contengono 5-30 sepolture distribuite temporalmente
- Alcune posizioni (piattaforme centrali) preferite, risultando in sepolture sovrapposte multiple
- Pratiche funerarie includono disarticolazione, rimozione crani (conservati/circolati separatamente)

L'analisi bioarcheologica integrata:

Stratigrafia: Sequenze di inumazioni ordinano cronologicamente individui **Isotopi** ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{18}\text{O}$): Maggioranza individui locali; ~ 10% migranti **aDNA:** Analisi di parentela rivelano strutture familiari; abitazioni occupate da gruppi imparentati matrilinealmente per generazioni **Paleopatologia:** Stress occupazionali (artropatie, traumi), diete (carie, usure dentali)

Micromorphology: Stratigrafia Microscopica

Campionamento in blocco di sezioni stratigrafiche, impregnazione con resine, taglio in sezioni sottili permette osservazioni microscopiche di micro-stratificazioni:

Pavimenti: Sequenze di intonaci spessi 0,5-2 mm ciascuno, separati da interfacce di usura. Inclusioni di fitoliti (silicificazioni vegetali) informano su piante processate in abitazioni.

Focolari: Lamine di ceneri alternate a lenti carbonose. Inclusi frammenti ossei combusti, semi carbonizzati identificabili botanicamente.

Riempimenti di sepolture: Distinzioni tra materiali di riempimento rapido (omogenei) vs infiltrazioni gradualmente (laminati).

La micromorphology documenta pratiche quotidiane invisibili macroscopicamente: pulizie abitative, gestione rifiuti, rituali domestici.

Caso di Studio 5: York - Stratigrafia Urbana Multi-Culturale

York (Eboracum romano, Jórvík vichingo, York medievale) esemplifica stratificazioni multi-culturali in contesto nord-europeo. Occupazione continua da I secolo CE genera sequenze archeologiche di 2.000 anni con transizioni culturali marcate.

Sequenza Stratigrafica al Coppergate

Lo scavo di Coppergate (1976-1981) espose 9 m di stratigrafia urbana:

Livello 1 (I-II sec CE): Eboracum romano. Strade lastricate, edifici in pietra, ceramiche Terra Sigillata, monete imperiali.

Livello 2 (III-V sec CE): Romano tardo. Declino edilizio, riciclo materiali, riduzione densità abitativa.

Livello 3 (V-VII sec CE): Post-romano/"Dark Age". Abbandono strutture romane, depositi di "dark earth" (terreni organici), evidenze minime costruttive. Hiatus archeologico apparente (realtà: attività ridotte, materiali deperibili non preservati).

Livello 4 (VIII-IX sec CE): Anglosassone. Grubenhaus (capanne semi-interrate), attività tessili (fusaiole, pesi da telaio).

Livello 5 (X sec CE): Jórvík vichingo. Edifici rettangolari in legno allineati lungo proprietà strette e profonde. Quartiere artigianale: lavorazione ambra, osso, metalli, cuoio. Condizioni anaerobiche preservano organici: legni, tessuti, cuoio, parassiti intestinali.

Livello 6 (XI-XII sec CE): Norman-medievale. Transizione a costruzioni in pietra, ceramiche di importazione, monetazione.

Livello 7-9 (XIII-XX sec CE): Medievale-moderno. Stratificazioni complesse, pozzi neri, cantine, fondazioni.

Dendrocronologia e Cronologia Assoluta

Oltre 2.000 campioni lignei da Coppergate sono stati dendrocronologicamente analizzati:

- Costruzione edificio vichingo 5: abbattimento alberi 935-937 CE
- Ricostruzione: 975 CE
- Abbandono: post-1000 CE (ceramiche Stamford Ware post-conquest)

Integrando dendrocronologia con stratigrafia, si genera cronologia assoluta ad alta risoluzione per sequenza vichinga, precedentemente databile solo genericamente a X secolo.

Archeologia Ambientale: Parassitologia e Paleoecologia Urbana

Latrine e depositi organici preservano uova di parassiti intestinali umani:

- **Trichuris trichiura** (tricocefalo): Indica condizioni igieniche scarse
- **Ascaris lumbricoides** (ascaride): Trasmissione fecale-orale
- **Diphyllobothrium** (tenia del pesce): Indica consumo pesce crudo/mal cotto

Variazioni diacroniche in frequenze parasitarie riflettono cambi in diete, igiene, densità abitativa:

- Picchi parassitosi periodo vichingo (densità elevata, igiene inadeguata)
- Riduzioni post-Conquest (miglioramenti infrastrutture, latrine canalizzate)

Analisi polliniche e macroresti botanici ricostruiscono vegetazione urbana, attività agricole, importazioni alimentari. Presenza polline *Juglans* (noce) e *Vitis* (vite) in livelli romani documenta importazioni mediterranee; assenza nei livelli post-romani e ricomparsa medievale riflettono cambi nelle reti commerciali.

Conclusioni Integrate dai Casi di Studio

I cinque casi illustrano la versatilità e potenza dell'approccio stratigrafico integrato:

Roma dimostra complessità estrema di palinsesti multi-millennari con continuità urbana; metodologie network per spolia rivelano economie di reimpiego.

Venezia esemplifica interazioni stratigrafia geologica-architettonica mediate dall'acqua; dendrocronologia su palafitte fornisce cronologie assolute; GIS 4D integra subsistenza dinamica.

Pompei offre snapshot sincrono eccezionale; stratigrafia vulcanica ad alta risoluzione; calchi di vuoti come stratigrafia negativa organica; microstratigrafie domestiche.

Catalhöyük mostra stratificazioni verticali abitati tell; bioarcheologia stratigrafica sub-pavimento; micromorphology rivela pratiche quotidiane.

York documenta transizioni multi-culturali; dendrocronologia assoluta; archeologia ambientale (parassitologia, palinologia) ricostruisce condizioni vita.

Trasversalmente, emerge che nessuna tecnica singola è sufficiente. L'integrazione rigorosa di stratigrafia archeologica, datazioni assolute multiple, analisi archeometriche, modellazione spaziale, fonti documentarie produce ricostruzioni robuste che superano largamente la somma delle parti.